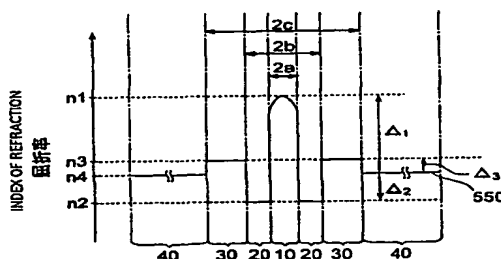


特許協力条約に基づいて公開された国際出願

大倉本館 創英国際特許法律事務所 Tokyo, (JP)

(54)発明の名称 分散補償ファイバ



S/3 Abstract
A dispersion compensating optical fiber, together with a dispersion-shifted fiber that provides zero dispersion in a 1.5-micron wavelength range and guides signal light in a 1.5-micron or 1.6-micron wavelength range, can compose an optical transmission line, which provides improved transmission characteristics and efficient dispersion compensation. The total dispersion slope of an optical transmission line is improved while the dispersion of a dispersion-shifted fiber is well compensated for. The dispersion compensating optical fiber has a triply-cladded structure including first, second and third cladding layers applied in sequence over the core. The difference in relative index of refraction between regions as well as their outside diameters are optimized while the dispersion of the dispersion-shifted fiber is compensated for so that an optical transmission system with a desirable total dispersion slope can be realized.

(57)要約

この発明に係る分散補償ファイバは、 $1.5\mu\text{m}$ 波長帯又は $1.6\mu\text{m}$ 波長帯の信号光を伝搬する、 $1.5\mu\text{m}$ 波長帯に零分散波長を有する分散シフトファイバとともに光伝送路を構成することにより、該光伝送路全体の伝送特性を改善し、効率的な分散補償や小型化が可能な構造を備えた光ファイバであって、該分散シフトファイバの分散を十分に補償した状態で、該光伝送路の全分散スロープを改善する構造を備える。当該分散補償ファイバは、コアの外周に順に設けられた、第1クラッド、第2クラッド及び第3クラッドを有する3重クラッド構造を有し、その各領域における比屈折率差及びそれらの外径の最適化により、分散シフトファイバを補償した状態で、好ましい全分散スロープを有する光伝送システムを実現する。

PCTに基づいて公開される国際出願のパンフレット第一頁に掲載されたPCT加盟国を同定するために使用されるコード(参考情報)

AE	アラブ首長国連邦	DM	ドミニカ	KZ	カザフスタン	RU	ロシア
AL	アルバニア	EE	エストニア	LC	セントルシア	SD	スーダン
AM	アルメニア	ES	スペイン	LI	リヒテンシュタイン	SE	スウェーデン
AT	オーストリア	FI	フィンランド	LK	スリ・ランカ	SG	シンガポール
AU	オーストラリア	FR	フランス	LR	リベリア	SI	スロヴェニア
AZ	アゼルバイジャン	GA	ガボン	LS	レソト	SK	スロヴァキア
BA	ボスニア・ヘルツェゴビナ	GB	英国	LT	リトアニア	SL	シエラ・レオネ
BB	バルバドス	GD	グレナダ	LU	ルクセンブルグ	SN	セネガル
BE	ベルギー	GE	グルジア	LV	ラトヴィア	SZ	スワジランド
BF	ブルキナ・ファソ	GH	ガーナ	MA	モロッコ	TD	チャード
BG	ブルガリア	GM	ガンビア	MC	モナコ	TG	トーゴ
BJ	ベナン	GN	ギニア	MD	モルドヴァ	TJ	タジキスタン
BR	ブラジル	GW	ギニア・ビサウ	MG	マダガスカル	TZ	タンザニア
BY	ベラルーシ	GR	ギリシャ	MK	マケドニア旧ユーゴスラヴィア共和国	TM	トルクメニスタン
CA	カナダ	HR	クロアチア	ML	マリ	TR	トルコ
CF	中央アフリカ	HU	ハンガリー	MN	モンゴル	TT	トリニダード・トバゴ
CG	コンゴ	ID	インドネシア	MR	モリタニア	UA	ウクライナ
CH	スイス	IE	アイルランド	MW	マラウイ	UG	ウガンダ
CI	コートジボアール	IL	イスラエル	MX	メキシコ	US	米国
CM	カメルーン	IN	インド	NE	ニジェール	UZ	ウズベキスタン
CN	中国	IS	アイスランド	NL	オランダ	VN	ヴェトナム
CR	コスタ・リカ	IT	イタリア	NO	ノルウェー	YU	ユーゴスラビア
CU	キューバ	JP	日本	NZ	ニュージーランド	ZA	南アフリカ共和国
CY	キプロス	KE	ケニア	PL	ポーランド	ZW	ジンバブエ
CZ	チェコ	KG	キルギスタン	PT	ポルトガル		
DE	ドイツ	KP	北朝鮮	RO	ルーマニア		
DK	デンマーク	KR	韓国				

明細書

分散補償ファイバ

技術分野

この発明は、1.5 μm 波長帯又は1.6 μm 波長帯の波長分割多重(WDM
5 : Wavelength Division Multiplexing)信号を利用した長距離かつ大容量の光通信を可能にする分散シフトファイバを含む光伝送路に適用され、該分散シフトファイバの分散を補償する分散補償ファイバに関するものである。

背景技術

10 長距離の高速・大容量通信に用いられる光ファイバ伝送路網では、伝送媒体として適用されるシングルモード光ファイバにおける材料分散(光ファイバの材料に固有の屈折率の波長依存性による分散)と構造分散(伝搬モードの群速度の波長依存性による分散)との和で表される分散(波長分散)が伝送容量の制限要因となっている。すなわち、光源から出力される光の波長は単一であると言っても、
15 厳密には一定のスペクトル幅を有する。このような光パルスが所定の波長分散特性を有するシングルモード光ファイバ中を伝搬すると、有限のスペクトル成分間で伝搬速度が異なるためパルス形状が崩れてしまう。この分散は、単位スペクトル幅(nm)及び単位光ファイバ長(km)あたりの伝搬遅延時間差として、単位(ps/km/nm)で表される。また、シングルモード光ファイバでは、
20 これら材料分散と構造分散が互いに打ち消し合い、1.31 μm 付近で分散がゼロになることが知られている。

分散シフトファイバは、光ファイバの伝送損失が1.55 μm 波長帯で最も小さくなることから、その零分散波長を1.3 μm 波長帯から1.55 μm 波長帯へシフトさせた光ファイバであって、該分散シフトファイバの分散を補償する
25 手段としては、分散補償ファイバが用いられるのが一般的である。このような分散シフトファイバを補償する技術としては、例えば特開平10-39155号に、

分散補償ファイバ及びそれを用いた光伝送システムが記載されている。

分散シフトファイバは、波長 1.55 μm 付近の所定波長においてその分散がゼロになるように設計されているが、正の分散スロープを有しているため、使用波長帯域全体に亘って波長分散の発生を抑えることは難しい。このため、互いに異なる波長の信号光成分を多重化し、伝送容量のさらなる大容量化を可能にした波長分割多重 (WDM: Wavelength Division Multiplexing) 方式による通信などにおいて、種々の伝送特性に関して波長ごとのバラツキが引き起こされる。これに対して、上記特開平 10-39155 号に記載された分散補償ファイバは、分散シフトファイバを含む光伝送路の分散スロープをも改善するように構成されている。

なお、分散スロープとは、波長分散を示すグラフにおける該グラフの傾きで与えられ、単位 ($\text{ps}/\text{nm}^2/\text{km}$) で表される。

発明の開示

発明者らは、従来の分散補償ファイバについて検討した結果、以下のような課題を発見した。すなわち、分散シフトファイバの分散補償を目的とした従来の分散補償ファイバは、その波長分散が小さいため、分散シフトファイバの分散補償に、より長いファイバ長が必要となっていた。このため、分散補償の効率が低く、また、装置等の大型化が避けられなかった。加えて、従来の分散補償ファイバは、補償対象である分散シフトファイバに適用される分散補償ファイバの諸特性についての最適化が不十分であり、分散シフトファイバが適用された光伝送路における分散スロープの改善についても十分ではなかった。

この発明は以上のような課題を解決するためになされたものであり、分散シフトファイバの分散を補償するとともに、該分散シフトファイバを含む光伝送システムに適用されることにより、より広い波長帯域で該光伝送システムの全分散スロープを改善し、かつ、効率的な分散補償や装置の小型化を可能にする構造を備

えた分散補償ファイバを提供することを目的としている。

5 この発明に係る分散補償ファイバは、 $1.5\mu\text{m}$ 波長帯又は $1.6\mu\text{m}$ 波長帯の信号光を伝搬する。 $1.5\mu\text{m}$ 波長帯に零分散波長を有する分散シフトファイバの分散を補償する光ファイバであって、所定の基準軸に沿って伸びたコア領域と該コア領域の外周に設けられたクラッド領域とを備えている。上記コア領域は、外径 $2a$ のコアから構成されている。また、上記クラッド領域は、該コアの外周に設けられた外径 $2b$ の第1クラッドと、該第1クラッドの外周に設けられた外径 $2c$ の第2クラッドと、該第2クラッドの外周に設けられた第3クラッドとで構成されている。

10 なお、当該分散補償ファイバにおいて、上記コアの屈折率 n_1 、上記第1クラッドの屈折率 n_2 、上記第2クラッドの屈折率 n_3 、上記第3クラッドの屈折率 n_4 は、条件 $n_1 > n_3 > n_4 > n_2$ を満たしている。また、第3クラッドに対するコア及び第1クラッドの各比屈折率差 Δ_1 及び Δ_2 は、少なくとも条件 $1\% \leq \Delta_1 \leq 3\%$ 、及び $\Delta_2 \leq -0.4\%$ を満たしている。さらに、当該分散補償ファイバにおいて、コアの外径 $2a$ と第2クラッドの外径 $2c$ は、条件 $2a/2c \leq 0.3$ を満たしている。

20 この発明に係る分散補償ファイバは、 $1.5\mu\text{m}$ 波長帯又は $1.6\mu\text{m}$ 波長帯の信号光を伝搬する分散シフトファイバとで光伝送システムを構成するとき、使用波長帯域内の信号波長のうち最小波長 λ_s と最大波長 λ_L の各光に対して、該光伝送システムにおける全分散スロープが $-0.024\text{ps}/\text{nm}^2/\text{km}$ 以上かつ $0.024\text{ps}/\text{nm}^2/\text{km}$ 以下になるのに十分な長さを有することを特徴としている。

具体的に、当該分散補償ファイバの長さ L_{DCF} は、使用波長帯域内の信号波長のうち波長 λ_m の光に対して、以下の条件を満たすように設定されている：

25
$$|D_{DSF}(\lambda_m) \cdot L_{DSF} + D_{DCF}(\lambda_m) \cdot L_{DCF}| \leq 200\text{ps}/\text{nm}$$

ここで、

$D_{DSF}(\lambda_m)$: 波長 λ_m における分散シフトファイバの分散

L_{DSF} : 分散シフトファイバの長さ

$D_{DCF}(\lambda_m)$: 波長 λ_m における当該分散補償ファイバの分散

L_{DCF} : 当該分散補償ファイバの長さ。

- 5 さらに好ましくは、当該分散補償ファイバの長さ L_{DCF} は、使用波長帯域内の全ての信号波長 λ_{all} の光に対して、以下の条件を満たすように設定されている:

$$|D_{DSF}(\lambda_{all}) \cdot L_{DSF} + D_{DCF}(\lambda_{all}) \cdot L_{DCF}| \leq 200 \text{ ps/nm}$$

- 10 ここで、

$D_{DSF}(\lambda_{all})$: 全ての使用波長 λ_{all} における分散シフトファイバの分散

L_{DSF} : 分散シフトファイバの長さ

$D_{DCF}(\lambda_{all})$: 全ての使用波長 λ_{all} における当該分散補償ファイバの分散

15

L_{DCF} : 当該分散補償ファイバの長さ。

- 20 また、第3クラッドに対するコアの比屈折率差 Δ_1 は、低伝送損失が要求される場合、条件 $1\% \leq \Delta_1 \leq 2\%$ を満たすのが好ましく、高分散による高分散補償効率が要求される場合には、条件 $2\% \leq \Delta_1 \leq 3\%$ を満たすのが好ましく、用途や設備等の諸条件から該 Δ_1 の範囲を適宜設定することが可能である。

- 25 このように、単一のコアを有するコア領域と、該コア領域の外周に設けられた3つのクラッドを有するクラッド領域(3重クラッド構造)を備えた当該分散補償ファイバによれば、その各部の屈折率及び外径を上記のような条件を満たすよう設定することにより、当該分散補償ファイバが適用された光伝送システムにおける全分散スロープを改善することができる。また、当該分散補償ファイバをモジュール化したときに、分散補償の効率化や装置の小型化が可能な程度の、絶対

値が十分大きい波長分散が選択できる。

特に、分散シフトファイバは、分散の絶対値が小さいにもかかわらず分散スロープが大きい、2重クラッド構造の分散補償ファイバによる分散補償では、分散スロープの補償と分散の補償を両立させることができないか、あるいは補償対象である分散シフトファイバと同程度の長さが必要となる。さらに、曲げ損失も大きいなど、実用上問題がある。このような問題は、クラッド領域に上述のような3重クラッド構造を適用することにより、当該分散補償ファイバの諸特性を最適化することができる。

例えば、3重クラッド構造の分散補償ファイバにおいては、負の値を有する分散の絶対値が大きいほど、分散補償に必要な分散補償ファイバの長さを短くすることができ、分散補償の効率化が図れる。特に、第3クラッドに対するコアの比屈折率差 Δ_1 が1%以上かつ3%以下であるということは、例えば波長 $1.55\mu\text{m}$ の光に対する分散が、およそ $-200\text{ps}/\text{nm}/\text{km}$ 以上かつ $0\text{ps}/\text{nm}/\text{km}$ 以下であることに相当する。

また、第3クラッドに対するコアの比屈折率差 Δ_1 が1%以上かつ2%以下であるということは、例えば波長 $1.55\mu\text{m}$ の光に対する分散が、およそ $-100\text{ps}/\text{nm}/\text{km}$ 以上かつ $0\text{ps}/\text{nm}/\text{km}$ 以下であることに相当する。同様に、第3クラッドに対するコアの比屈折率差 Δ_1 が2%以上かつ3%以下ということは、例えば波長 $1.55\mu\text{m}$ の光に対する分散が、およそ $-200\text{ps}/\text{nm}/\text{km}$ 以上かつ $-100\text{ps}/\text{nm}/\text{km}$ 以下であることに相当する。

分散は、 Δ_1 の値を大きくすることによって増大するが、この Δ_1 の値を大きくするためには例えばコアへ添加される GeO_2 の添加量を増やす必要がある。一方、 GeO_2 の添加量増加は、伝送損失の増加を引き起こす。したがって、 Δ_1 に関する条件の範囲内において、低伝送損失が要求められる場合には条件 $1\% \leq \Delta_1 \leq 2\%$ 、高分散による高分散補償効率 que 求められる場合には条件 $2\% \leq \Delta_1 \leq 3\%$ を、用途・設備等の諸条件から適宜選択するのが好ましい。

なお、この発明に係る分散補償ファイバにおいて、上記第3クラッドに対する第2クラッドの比屈折率差 Δ_3 は、条件 $\Delta_3 \geq 0.1\%$ を満たすのが好ましい。また、第1クラッドの外径に対するコアの外径の比は、条件 $0.2 \leq 2a/2b \leq 0.5$ を満たすのが好ましい。加えて、この発明に係る分散補償ファイバは、
5 波長 $1.55 \mu\text{m}$ の光に対して、 10 dB/m 以下の直径 60 mm での曲げ損失と、 $0.5 \text{ ps} \cdot \text{km}^{-1/2}$ 以下の偏波モード分散と、 1 dB/km の伝送損失を有する。

実用上、このような分散補償ファイバは、コイル状に巻かれた小型のモジュールとして用いられることがある。この場合、特に、曲げ損失を小さくすることによって、装置の小型化と、それに伴う伝送損失の増加が抑制できる。
10

以上のように、 $1.55 \mu\text{m}$ 波長帯のWDM信号が伝搬する分散シフトファイバと、該分散シフトファイバの分散を補償するのに十分な長さを有するこの発明に係る分散補償ファイバとで光伝送システムを構成することにより、該光伝送システムは、使用波長帯域内の信号波長のうち最小波長 λ_s と最大波長 λ_L の各光
15 に対して、 $-0.024 \text{ ps/nm}^2/\text{km}$ 以上かつ $0.024 \text{ ps/nm}^2/\text{km}$ 以下、好ましくは $-0.012 \text{ ps/nm}^2/\text{km}$ 以上かつ $0.012 \text{ ps/nm}^2/\text{km}$ 以下の全分散スロープを有することとなる。

図面の簡単な説明

20 図1Aは、この発明に係る分散補償ファイバの断面構造を示す図であり、図1Bは、図1Aに示された分散補償ファイバの屈折率プロファイルを示す図である。

図2は、この発明に係る分散補償ファイバが適用された光伝送システムの一例を示す図である。

25 図3A～図3Cは、この発明に係る分散補償ファイバの第1実施例において、その分散、分散スロープ、及び直径 60 mm での曲げ損失の、コア外径に対する

依存性を示すグラフである。

図4は、第1実施例に係る分散補償ファイバにおいて、その分散と分散スロープとの関係を示すグラフである。

5 図5A～図5Cは、この発明に係る分散補償ファイバの第2実施例において、その分散、分散スロープ、及び直径60mmでの曲げ損失の、コア外径に対する依存性を示すグラフである。

図6は、第2実施例に係る分散補償ファイバにおいて、その分散と分散スロープとの関係を示すグラフである。

10 図7は、この発明に係る分散補償ファイバの第3実施例において、その分散と分散スロープとの関係を示すグラフである。

図8A～図8Eは、第3実施例に係る分散補償ファイバにおいて、その全分散スロープ、分散、直径20mmでの曲げ損失、実効断面積 (A_{eff})、及びカットオフ波長の、コア外径に対する依存性を示すグラフである。

15 図9は、この発明に係る分散補償ファイバの第4実施例において、その分散及び分散スロープの波長依存性を示すグラフである。

図10は、第4実施例に係る分散補償ファイバの分散と、2重クラッド構造を備えた分散補償ファイバ（比較例）の分散とを比較するためのグラフである。

図11は、2重クラッド構造を有する比較例（分散補償ファイバ）の屈折率プロファイルを示す図である。

20 図12は、第4実施例に係る分散補償ファイバにおいて、 Δ_1 を変化させたときの分散とコア外径との関係を示すグラフである。

図13は、第4実施例に係る分散補償ファイバにおいて、 Δ_1 を変化させたときの分散と直径40mmでの曲げ損失との関係を示すグラフである。

25 図14は、第4実施例に係る分散補償ファイバにおいて、 $2a/2b$ を変化させたときの分散とコア外径との関係を示す図である。

図15は、第4実施例に係る分散補償ファイバにおいて、 $2a/2c$ を変化さ

せたときの分散と直径40mmでの曲げ損失との関係を示すグラフである。

図16は、第4実施例に係る分散補償ファイバにおいて、 $2a/2c$ を変化させたときの分散とコア外径との関係を示すグラフである。

5 図17は、第4実施例に係る分散補償ファイバにおいて、 $2a/2c$ を変化させたときの分散と直径40mmでの曲げ損失との関係を示すグラフである。

図18は、この発明に係る分散補償ファイバと分散シフトファイバとで構成された光伝送システムにおいて、その分散の波長依存性を示すグラフである（その1）。

10 図19は、この発明に係る分散補償ファイバと分散シフトファイバとで構成された光伝送システムにおいて、その分散の波長依存性を示すグラフである（その2）。

図20は、この発明に係る分散補償ファイバが適用された光伝送システムの他の構成例を示す図である。

15 図21は、この発明に係る分散補償ファイバが適用された光伝送システムの他の構成例を示す図である。

発明を実施するための最良の形態

20 以下、この発明に係る分散補償ファイバの各実施例を、図1A、1B、2、3A～3C、4、5A～5C、6～7、8A～8E、9～21を用いて説明する。
なお、図面中の同一要素には同一符号を付し、重複する説明を省略する。また、図面の寸法比率は、説明のものと必ずしも一致していない。

25 図1Aは、この発明に係る分散補償ファイバの断面構造を示す図であり、当該分散補償ファイバ100は、外径 $2a$ のコア1を有するコア領域と、該コア1の外周に設けられた外径 $2b$ の第1クラッド2、該第1クラッド2の外周に設けられた外径 $2c$ の第2クラッド3、及び該第2クラッド3の外周に設けられた第3クラッド4からなる3重クラッド構造のクラッド領域5とを備えている。図1B

は、図1 Aに示された分散補償ファイバ1 0 0の径方向（図中の線Lで示された方向）の屈折率プロファイル5 5 0を示す図である。なお、図1 Bに示された屈折率プロファイル5 5 0の横軸は、図1 A中の線Lに沿った、コア1の中心軸に対して垂直な断面上の各部位に相当している。したがって、図1 B中の屈折率プロファイル5 5 0において、領域1 0はコア1の線L上の各部位における屈折率、領域2 0は第1クラッド2の線L上の各部位における屈折率、領域3 0は第2クラッド3の線L上の各部位における屈折率、領域4 0は第3クラッド4の線L上の各部位における屈折率をそれぞれ示している。

当該分散補償ファイバ1 0 0は、 SiO_2 （石英ガラス）を主成分とする光導波路であり、その特性は当該分散補償ファイバ1 0 0を構成する各領域の外径及び屈折率等によって制御される。なお、図1 Bに示された屈折率プロファイル5 5 0中の Δ は、第3クラッド4の屈折率を基準とした各領域の比屈折率差を示し、以下のように定義される。

$$\Delta_1 = (n_1 - n_4) / n_4$$

$$\Delta_2 = (n_2 - n_4) / n_4$$

$$\Delta_3 = (n_3 - n_4) / n_4$$

ここで、 n_1 はコア1の屈折率、 n_2 は第1クラッド2の屈折率、 n_3 は第2クラッド3の屈折率、 n_4 は第3クラッド4の屈折率である。また、この明細書では、比屈折率差 Δ は百分率で表示されており、各定義式における各領域の屈折率は順不同である。したがって、 Δ が負の値の場合、対応する領域の屈折率は第3クラッド4の屈折率よりも低いことを意味する。

この発明に係る分散補償ファイバは、上記各領域1～4の各屈折率が、以下の条件（1）：

$$n_1 > n_3 > n_4 > n_2 \quad \dots (1)$$

を満たすように構成されている。これにより、第3クラッド4に対する各領域の比屈折率差は、次の条件（1 a）：

$$\Delta_1 > \Delta_3 > 0\% > \Delta_2 \quad \dots (1a)$$

を満たしている（条件（１）及び（１a）は等価である）。すなわち、 Δ_1 及び Δ_3 が正の値、 Δ_2 が負の値を有し、また、 Δ_1 の値が最も大きくなるように構成されている。

- 5 このような屈折率プロファイルを有する３重クラッド構造の光ファイバは、例えば次のように構成される。最も外側に位置する第３クラッド４を、 SiO_2 によって形成する。それに対して、 SiO_2 を主材料とするコア１及び第２クラッド３には GeO_2 がそれぞれ所定量添加され、その屈折率が SiO_2 に比して高くなるように制御されている。一方、 SiO_2 を主材料とする第１クラッド２に
- 10 はF（フッ素）が所定量添加され、その屈折率が SiO_2 に比して低くなるように制御されている。なお、このような不純物添加による屈折率制御の具体的方法及び構成に関しては、上記の構成はその一例であって、これに限られるものではない。例えば、第３クラッド４は純粋な SiO_2 ではなくF等の屈折率調節剤が所定量添加されていてもよい。

- 15 それぞれの比屈折率差は、さらに次の条件（２）及び（３）：

$$1\% \leq \Delta_1 \leq 3\% \quad \dots (2)$$

$$\Delta_2 \leq -0.4\% \quad \dots (3)$$

を満たしている。また、それぞれの外径は、次の条件（４）：

$$2a/2c \leq 0.3 \quad \dots (4)$$

- 20 を満たしている。以上のように各領域の屈折率及び外径を設定することにより、十分な分散スロープの改善が実現できる分散補償ファイバが得られる。また、さらに次の条件（５）及び（６）：

$$\Delta_3 \geq 0.1\% \quad \dots (5)$$

$$0.2 \leq 2a/2b \leq 0.5 \quad \dots (6)$$

- 25 を満たすことにより、より好適な分散補償ファイバが得られる。

なお、当該分散補償ファイバの分散が、例えば波長 $1.55\mu\text{m}$ に対して Δ_1

= 1 %で 0 ps/nm/km 程度、 $\Delta_1 = 3\%$ で -200 ps/nm/km 程度である。したがって、第3クラッド4に対するコア1の比屈折率差 Δ_1 に関する条件(2)の範囲 $1\% \leq \Delta_1 \leq 3\%$ において、 Δ_1 の値を大きくすれば、負の値を有する分散の絶対値を大きくすることができ、分散補償の効率化を図ることができる。一方、 Δ_1 の値を大きくするためには、例えばコア1に添加される GeO₂の量を増やして、その屈折率 n_1 を大きくする必要があるが、その場合、添加される GeO₂に起因したレーリ-散乱の増大等によって、伝送損失が大きくなってしまう。この発明に係る分散補償ファイバにおいては、 Δ_1 の上限値を3%に設定することによって、補償対象である分散シフトファイバの十分な分散補償を確保しつつ、かつ、その伝送損失が 1 dB/km 以下に抑えることができる。

さらに、条件(2)の範囲を次の2つの条件(7)及び(8)：

$$1\% \leq \Delta_1 \leq 2\% \quad \dots (7)$$

$$2\% \leq \Delta_1 \leq 3\% \quad \dots (8)$$

に変更してもよい。これら2つの条件を満たす分散補償ファイバについては、必要に応じて選択することができる。すなわち、低伝送損失がより重視される場合には条件(7)に適合するよう Δ_1 を選択し、また、高分散がより重視される場合には条件(8)に適合する Δ_1 を選択すればよい。

また、偏波モード分散(PMD)は、コア1の形状の真円からのずれを表す非円度の増大に伴って大きくなるが、その場合、コア1の屈折率が高い、すなわち Δ_1 の値が高いほど、真円からのずれに起因する偏波モード分散も増大する。この発明に係る分散補償ファイバにおいては、 Δ_1 の上限を3%以下に抑えることにより、例えば非円度0.5%以下の場合に偏波モード分散を $0.5 \text{ ps} \cdot \text{km}^{-1/2}$ 以下に抑えることができる。

図2は、この発明に係る分散補償ファイバが適用された光伝送システムの一構成例を示す図である。この光伝送システムにおいては、補償対象である分散シフ

トファイバ200の一端（入射端）は、シングルモード光ファイバなどの光ファイバ伝送路300を介して送信器400と光学的に接続されるとともに、他端（出射端）は、この発明に係る分散補償ファイバ100の一端（入射端）に光学的に接続されている。一方、分散補償ファイバ100の他端（出射端）は、シングルモード光ファイバなどの光ファイバ伝送路300を介して受信器500と光学的に接続されている。

なお、当該分散補償ファイバ100が適用された光伝送システムにおける全分散及び全分散スロープは、以下のように定義される。すなわち、図2に示されたように、分散 D_{DSF} （波長 $1.55\mu\text{m}$ において $17\text{ps}/\text{nm}/\text{km}$ ）、分散スロープ S_{DSF} （ $0.06\text{ps}/\text{nm}^2/\text{km}$ ）を有する長さ L_{DSF} の分散シフトファイバ200と、分散 D_{DCF} 、分散スロープ S_{DCF} を有する長さ L_{DCF} の分散補償ファイバ100で構成された光伝送システムにおける全分散は、

$$D_{DSF} \cdot L_{DSF} + D_{DCF} \cdot L_{DCF}$$

で与えられる。また、当該光伝送システムにおける全分散スロープは、

$$(S_{DSF} \cdot L_{DSF} + S_{DCF} \cdot L_{DCF}) / L_{DSF}$$

で与えられる。ここで、当該分散補償ファイバ100の長さは、該分散補償ファイバ100及び分散シフトファイバ200からなる伝送路部分に比して非常に短いので、光伝送システムにおける全分散及び全分散スロープへの寄与は無視できる。

この発明に係る分散補償ファイバは、分散シフトファイバとともに適用された光伝送システムにおいて、波長 $1.55\mu\text{m}$ の光に対して十分に分散が補償される条件の下、すなわち全分散がゼロになる条件の下で、その全分散スロープの値を $-0.024\text{ps}/\text{nm}^2/\text{km}$ 以上かつ $0.024\text{ps}/\text{nm}^2/\text{km}$ 以下にするような諸特性を有する。

この全分散スロープの数値範囲の根拠については、以下の通りである。すなわち、信号帯域の帯域幅 30nm 、伝送距離 300km でのWDM伝送の場合、全

分散スロープが $0.024 \text{ ps/nm}^2/\text{km}$ であるとき、信号帯域の両端（信号帯域における最小波長と最大波長）では 216 ps/nm の差を生じる。このような光伝送における伝送限界の許容分散幅は、例えば「Optical Fiber Communication (OFC'96) Technical digest Postdeadline paper PD19 (1996)」に記述されており、その記述によれば、シングルモード光ファイバ 150 km の光伝送において、帯域幅を 32.4 nm としたとき、およそ 200 ps/nm が許容分散幅の限界である。これをふまえると、少なくとも 150 km 以上の光ファイバ伝送路において、広帯域かつ高速の WDM 伝送を行うためには、該光伝送路の全分散スロープが $-0.024 \text{ ps/nm}^2/\text{km}$ 以上かつ $0.024 \text{ ps/nm}^2/\text{km}$ 以下である必要がある。

さらに、全分散スロープの値を $-0.012 \text{ ps/nm}^2/\text{km}$ 以上かつ $0.012 \text{ ps/nm}^2/\text{km}$ 以下にする分散補償ファイバを適用することにより、より高速な光伝送が可能な光伝送システムを実現することができる。すなわち、 20 Gbit/sec もしくは 30 Gbit/sec での高速な光伝送では、全分散スロープの値をさらに小さくする必要がある。「Optical Fiber Communication (OFC'96) Technical digest Postdeadline paper PD19 (1996)」の記述によれば、全分散スロープを $-0.012 \text{ ps/nm}^2/\text{km}$ 以上かつ $0.012 \text{ ps/nm}^2/\text{km}$ 以下とすることによって、およそ $500 \sim 600 \text{ km}$ までの光伝送が可能となる。

なお、以上のような光伝送システムを構成するため、当該分散補償ファイバの長さ L_{DCF} は、使用波長帯域内の信号波長のうち波長 λ_m の光に対して、以下の条件を満たすように設定されている：

$$|D_{DSF}(\lambda_m) \cdot L_{DSF} + D_{DCF}(\lambda_m) \cdot L_{DCF}| \leq 200 \text{ ps/nm}$$

ここで、

$D_{DSF}(\lambda_m)$: 波長 λ_m における分散シフトファイバの分散
 L_{DSF} : 分散シフトファイバの長さ

$D_{DCF}(\lambda_m)$: 波長 λ_m における当該分散補償ファイバの分散

L_{DCF} : 当該分散補償ファイバの長さ。

さらに好ましくは、当該分散補償ファイバの長さ L_{DCF} は、使用波長帯域内の全ての信号波長 λ_{all} の光に対して、以下の条件を満たすように設定されている：

$$|D_{DSF}(\lambda_{all}) \cdot L_{DSF} + D_{DCF}(\lambda_{all}) \cdot L_{DCF}| \leq 200 \text{ ps/nm}$$

ここで、

$D_{DSF}(\lambda_{all})$: 全ての使用波長 λ_{all} における分散シフトファイバの分散

L_{DSF} : 分散シフトファイバの長さ

$D_{DCF}(\lambda_{all})$: 全ての使用波長 λ_{all} における当該分散補償ファイバの分散

L_{DCF} : 当該分散補償ファイバの長さ。

次に、上述の全分散スロープの値とともに、当該分散補償ファイバを評価する指標として採用された分散補償率について説明する。この明細書において、分散シフトファイバを補償対象とする分散補償ファイバの分散補償率とは、波長 1.55 μm における分散シフトファイバの分散スロープに対する分散補償ファイバの分散スロープの割合を、波長 1.55 μm における分散シフトファイバの分散に対する分散補償ファイバの分散の割合で割ったものとして定義され、分散シフトファイバ及び分散補償ファイバにより光伝送システムが構成されたときの、該光伝送システムにおける全分散及び全分散スロープの相関を表す。すなわち、分散シフトファイバの分散を D_{DSF} 、その分散スロープを S_{DSF} とし、分散補償ファイバの分散を D_{DCF} 、その分散スロープを S_{DCF} とするとき、分散補償率 DSCR は

$$DSCR = (S_{DCF} / D_{DCF}) / (S_{DSF} / D_{DSF})$$

で与えられる。

例えば、分散補償率が100%の光伝送システムでは、全分散がゼロになるように分散シフトファイバ及び分散補償ファイバの長さ比が設定され、同時に全分散スロープの値が $0 \text{ ps/nm}^2/\text{km}$ となり、全分散及び全分散スロープが同時かつ完全に補償される。また、分散補償率が100%以下であって例えば50%の光伝送システムでは、全分散がゼロになるように分散シフトファイバ及び分散補償ファイバの長さ比が設定されても、全分散スロープは50%しか補償されない。この場合、分散シフトファイバの分散スロープが $0.07 \text{ ps/nm}^2/\text{km}$ であれば、補償後の全分散スロープは $0.035 \text{ ps/nm}^2/\text{km}$ となる。逆に、分散補償率が100%以上であって例えば150%の光伝送システムでは、全分散がゼロになるように分散シフトファイバ及び分散補償ファイバの長さ比が設定されても、全分散スロープは50%の補償超過となる。この場合、分散シフトファイバの分散スロープが $0.07 \text{ ps/nm}^2/\text{km}$ であれば、補償後の全分散スロープは $-0.035 \text{ ps/nm}^2/\text{km}$ となる。

この発明に係る分散補償ファイバが適用された光伝送システムに関し、 $-0.024 \text{ ps/nm}^2/\text{km}$ 以上かつ $0.024 \text{ ps/nm}^2/\text{km}$ 以下となる全分散スロープについての条件は、例えば分散スロープが $0.07 \text{ ps/nm}^2/\text{km}$ の分散シフトファイバに当該分散補償ファイバが接続された場合、分散補償率が約66%以上134%以下であることに相当する。同様に、 $-0.012 \text{ ps/nm}^2/\text{km}$ 以上かつ $0.012 \text{ ps/nm}^2/\text{km}$ 以下という全分散スロープについての条件は、分散補償率が約83%以上117%以下であることに相当する。

なお、このような光伝送システムの構成は上記の構成には限られない。例えば図2では、分散補償ファイバ100は、分散シフトファイバ200の下流側に配置されているが、分散シフトファイバ200の上流側に配置されてもよい。また、図2に示された光伝送システムの光伝送路は、双方向通信可能な光伝送路網で

あってもよい。光ファイバ伝送路300については、シングルモード光ファイバに限らず、必要に応じて他の形態の光ファイバを用いてもよい。必要があれば、伝送路上に中継器等を設置することも可能である。

5 以下、この発明に係る分散補償ファイバの具体的な実施例、及びその特性について説明する。なお、以下に示す各実施例における分散及び分散スロープ等の諸特性については、すべて有限要素法を用いた計算結果による。

(第1実施例)

10 第1実施例に係る分散補償ファイバの断面構造及びその屈折率プロファイルは、図1Aに示された断面構造及び図1Bに示された屈折率プロファイルとそれぞれ同様であり、該第1実施例に係る分散補償ファイバとしては、第3クラッド4
に対するコア1の比屈折率差 Δ_1 は1.1%、第3クラッド4に対する第1クラッド2の比屈折率差 Δ_2 は-0.7%、第3クラッド4に対する第2クラッド3の比屈折率差 Δ_3 は0.08%、第1クラッド2の外径2bに対するコア1の外
15 径2aの比 $2a/2b$ は0.42に、それぞれ固定され、第2クラッド3の外
径2cに対するコア1の外径2aの比 $2a/2c$ が、それぞれ(a)0.10、
(b)0.13、(c)0.15、及び(d)0.20である4種類のサンプル
が用意された。なお、上記比屈折率差 Δ_1 、 Δ_2 、 Δ_3 、及び $2a/2b$ は、上述
の各条件(1)、(2)、(3)、(6)及び(7)を満たしており、上記 $2a/2c$
は、条件(4)を満たしている。

20 図3A～図3Cに、波長 $1.55\mu\text{m}$ の光に対する分散($D_a\sim D_d$)、分散
スロープ($S_a\sim S_d$)、及び直径60mmでの曲げ損失($B_a\sim B_d$)を、 $2a/2c$ の各値について示すグラフである。なお、それぞれの添字a～dは、 $2a/2c$ のそれぞれの値(a)～(d)に対応している。横軸はコア1の外径2
aであり、計算された範囲では曲げ損失の値はおよそ 10^{-2}dB/m 以下の小
25 さい値となっている。また、分散は、およそ $-50\sim 0\text{ps/nm/km}$ の範囲
、分散スロープは、およそ $-2.0\sim 0\text{ps/nm}^2/\text{km}$ の範囲にある。

これらの分散及び分散スロープの対応関係が図4のA a～A dに示されている。図4のグラフ中、点線P 0～P 4は、波長 $1.55\mu\text{m}$ において $2\text{ps}/\text{nm}/\text{km}$ の分散及び $0.07\text{ps}/\text{nm}^2/\text{km}$ の分散スロープを有する分散シフトファイバへの接続を想定したときの分散補償率を示している。点線P 0は分散補償率100%の場合を示し、分散が完全に補償されかつ全分散スロープが $0\text{ps}/\text{nm}^2/\text{km}$ である状態に対応している。点線P 1及びP 2はそれぞれ分散補償率が約66%及び134%の場合を示し、同様に全分散スロープが 0.024 及び $-0.024\text{ps}/\text{nm}^2/\text{km}$ である状態に対応している。点線P 3及びP 4はそれぞれ分散補償率が約83%及び117%の場合を示し、全分散スロープが 0.012 及び $-0.012\text{ps}/\text{nm}^2/\text{km}$ である状態に対応している。これらの関係から本実施例の分散補償ファイバとしては、 $2a/2c$ の値が0.10の場合(a)が最も好適であることが分かる。すなわち、第3クラッド4に対する第2クラッド3の比屈折率差 Δ_3 が0.08%であるとき、第2クラッド3の外径 $2c$ を大きくすることにより、曲げ損失の増加を効果的に抑制できる分散補償ファイバが得られる。

(第2実施例)

次に、この第2の実施例も第1実施例と同様に図1A及び図1Bに示された構造及び屈折率プロファイルを有する。また、この第2実施例に係る分散補償ファイバとしては、第3クラッド4に対するコア1の比屈折率差 Δ_1 が2.5%、第3クラッド4に対する第1クラッド2の比屈折率差 Δ_2 が -0.7% 、第3クラッド4に対する第2クラッド3の比屈折率差 Δ_3 が0.8%、第2クラッド3の外径 $2c$ に対する第1クラッド2の外径 $2b$ の比 $2b/2c$ が0.44に、それぞれ固定され、第1クラッド2の外径 $2b$ に対するコア1の外径 $2a$ の比 $2a/2b$ が、それぞれ(a)0.25、(b)0.34、及び(c)0.41である3種類のサンプルが用意された。なお、上記比屈折率差 Δ_1 、 Δ_2 、 Δ_3 、及び $2b/2c$ は、上述の各条件(1)、(2)、(3)及び(8)を満たしており、3種

類の $2a/2b$ は、いずれも条件 (4) 及び (6) を満たしている。

図 5 A ~ 図 5 C は、波長 $1.55 \mu\text{m}$ の光に対する分散 ($D a \sim D c$)、分散スロープ ($S a \sim S c$)、及び直径 60 mm での曲げ損失 ($B a \sim B c$) を、 $2a/2b$ の各値について示すグラフである。なお、それぞれの添字 $a \sim c$ は、 $2b/2c$ のそれぞれの値 (a) ~ (c) に対応している。横軸はコア 1 の外径 $2a$ であり、計算された範囲では曲げ損失の値はおよそ 10^{-4} dB/m 以下の小さい値となっている。また、分散は、およそ $-200 \sim -50 \text{ ps/nm/km}$ の範囲、分散スロープは、およそ $-2.0 \sim 0 \text{ ps/nm}^2/\text{km}$ の範囲にある。

これらの分散及び分散スロープの対応関係が図 6 の $A a \sim A c$ に示されている。図 6 のグラフにおいて、点線 $P 0 \sim P 4$ は、波長 $1.55 \mu\text{m}$ において 5 ps/nm/km の分散及び $0.07 \text{ ps/nm}^2/\text{km}$ の分散スロープを有する分散シフトファイバへの接続を想定したときの分散補償率を示している。各点線に対応する分散補償率及び全分散スロープについては、図 4 のグラフの場合と同様である。これらの関係から本実施例の分散補償ファイバとしては、 $2a/2b$ の値が 0.25 の場合 (a) が最も好適であることが分かる。

ここで、上述の第 1 実施例は、第 3 クラッド 4 に対するコア 1 の比屈折率差 Δ_1 が 1.1% であって、該比屈折率差 Δ_1 が条件 (7): $1\% \leq \Delta_1 \leq 2\%$ の範囲にある例であったが、この第 2 実施例では、比屈折率差 Δ_1 (2.5%) が条件 (8): $2\% \leq \Delta_1 \leq 3\%$ の範囲にある。このとき、第 1 実施例では分散が $-50 \sim 0 \text{ ps/nm/km}$ の範囲であったのに対して、第 2 実施形態では $-200 \sim -50 \text{ ps/nm/km}$ の範囲と、比屈折率差 Δ_1 を大きくすることによって分散の絶対値が増大している。その他のパラメータについても同様であるが、第 1 実施例及び第 2 実施例を対比することにより明らかなように、分散補償ファイバの諸特性はこれらの屈折率及び外径に関するパラメータに大きく依存しており、その分散補償ファイバの用途あるいは必要な条件に応じた特性を有するように

、各パラメータを最適化することが重要である。

(第3実施例)

この第3の実施例も第1及び第2実施例と同様に図1A及び図1Bに示された構造及び屈折率プロファイルを有する。また、この第3実施例に係る分散補償ファイバとしては、第3クラッド4に対するコア1の比屈折率差 Δ_1 が1.4%、第3クラッド4に対する第2クラッド3の比屈折率差 Δ_3 が0.4%、第1クラッドの外径2bに対するコア1の外径2aの比 $2a/2b$ が0.4、第2クラッド3の外径2cに対するコア1の外径2aの比 $2a/2c$ が0.27に固定されており、第3クラッド4に対する第1クラッドの比屈折率差 Δ_2 を-0.8%～-0.3%の範囲にある複数のサンプルが用意された。なお、上記比屈折率差 Δ_1 、 Δ_3 、 $2a/2b$ 、及び $2a/2c$ は、上述の各条件(1)、(2)、(4)、(5)、(6)及び(7)を満たしており、上記比屈折率差 Δ_2 は、-0.3%のサンプルを除いて条件(3)を満たしている。

この第3実施例に係る分散補償ファイバについて、その分散及び分散スロープの対応関係が図7のグラフに示されている。このグラフにおいて、点線P0～P4は、波長 $1.55\mu\text{m}$ において 5ps/nm/km の分散及び $0.07\text{ps/nm}^2/\text{km}$ の分散スロープを有する分散シフトファイバへの接続を想定したときの分散補償率を示している。なお、各点線に対応する分散補償率及び全分散スロープの値については、図4のグラフの場合と同様である。このグラフからも分かるように、 Δ_2 の絶対値が大きくなるにしたがって(-0.8%、-0.7%、... -0.3%)、ある分散値に対する分散スロープの絶対値が大きくなり、 Δ_2 を-0.7%付近に設定することによって分散補償率100%を示す点線P0に漸近し、広い分散値の範囲において分散スロープも同時に補償することが可能となる。

図8A～図8Eは、好適な値として $\Delta_2 = -0.7\%$ のときの波長 $1.55\mu\text{m}$ の光に対する全分散スロープ、分散、直径20mmでの曲げ損失、実効断面積

A_{eff} 、及びカットオフ波長をそれぞれ示すグラフである。各グラフにおいて横軸はコア1の外径 $2a$ である。ここで、全分散スロープは、上述の分散及び分散スロープを有する分散シフトファイバに対し、波長 $1.55\mu\text{m}$ における分散が完全に補償される条件の下、得られた値であるが、コア1の外径 $2a$ が約 $4.84\sim 5.13\mu\text{m}$ の非常に広い範囲に亘って、全分散スロープの絶対値は $0.012\text{ps}/\text{nm}^2/\text{km}$ 以下に抑えられる。なお、計算された全範囲に亘って全分散スロープの絶対値は $0.024\text{ps}/\text{nm}^2/\text{km}$ 以下であった。

また、当該分散補償ファイバは小型モジュールとして、コイル状に巻かれた状態で所定容器内に収納されて用いられることがある。そのため、当該分散補償ファイバの曲げ損失を考慮する必要がある。ここで、直径 20mm での曲げ損失の上限を $5\text{dB}/\text{m}$ とすると、コア1の外径 $2a$ の下限は図8Cのグラフからも分かるように、 $4.86\mu\text{m}$ である。さらに、当該分散補償ファイバの分散補償効率を高くして、必要なファイバ長を短くするためには、負の値を有する分散の絶対値を大きくすることが重要である。この第3実施例では、図8Bのグラフ中に示されているように $-60\text{ps}/\text{nm}/\text{km}$ 程度までの分散が達成可能である。これにより、分散補償ファイバの必要なファイバ長を分散シフトファイバ伝送路の $1/10$ 程度とすることが可能となる。

なお、曲げ損失については、この第3実施例の説明では直径 20mm での曲げ損失の値を示したが、直径 60mm での曲げ損失は、直径 20mm での曲げ損失の値よりも、さらに小さい値となる。

第3実施例に係る分散補償ファイバの場合、実効断面積 A_{eff} については、現行の分散補償ファイバと同等の約 $17\mu\text{m}^2$ 程度である（図8D参照）。また、ファイバ長 2m での2次モードのカットオフ波長は約 $1.8\mu\text{m}$ 程度である（図8E参照）。なお、この実施例では 2m のファイバ長においてシングルモードは保証されないが、カットオフ波長の距離依存性により、実際に使用される場合には十分なファイバ長があるのでシングルモードが保証される。

(第4実施例)

1. 55 μm 波長帯の分散シフトファイバを含む光伝送路では、非線形効果を抑制するために1. 58 μm 波長帯のWDM伝送を行う必要がある場合が考えられ、この発明に係る分散補償ファイバは、このような場合についても適用することが可能である。

図9は、この発明に係る分散補償ファイバの第4実施例における分散及び分散スロープの波長依存性の一例を示すグラフである。なお、C1は分散スロープのグラフを示し、C2は分散のグラフを示す。分散の極小値を適当に選択することによって、例えば-150~-300 ps/nm/km程度の絶対値の大きい分散の領域において、大きい分散スロープを得ることができる。ただし、このような領域は曲げ損失に弱い、1. 58 μm 波長帯の光に対する1. 5~3. 0 ps/nm/km程度の分散を有する分散シフトファイバの場合、1 km弱の長さで80 km程度の分散シフトファイバの分散及び分散スロープを補償することができる。したがって、モジュール（当該分散補償ファイバがコイル状に巻かれたもの）の最小径を大きめに設定し、かつ第2クラッド3の屈折率を大きくして曲げに強い構造にするとともに、カットオフ波長 λ_c の距離依存性も用いることで、実用可能な分散補償ファイバが得られる。

また、図10は、3重クラッド構造の分散補償ファイバにおける分散（図中、C100で示されている）と、比較例である2重クラッド構造の分散補償ファイバにおける分散（図中、C200で示されている）との波長依存性の一例を示すグラフである。2重クラッド構造の分散補償ファイバでは、基底カットオフ波長（極大となる波長）近辺で分散が極小値を持つが、3重クラッド構造の分散補償ファイバでは基底カットオフ波長が見られず、これによって大きな負の分散値を実現することができる。

なお、図11は、比較例である2重クラッド構造の分散補償ファイバの屈折率プロファイル560を示しており、比較例の分散補償ファイバは、図1Aに示さ

れた3重クラッド構造において第2クラッド3（領域30に相当）が除かれた構造（すなわち、 $2d=2b$ ）に相当する。したがって、図11の屈折率プロファイル560において、領域561は、図1A中に示されたコア1の線L上の各部位に相当するコア部の屈折率、領域562は、図1Aに示された第1クラッド2の線L上の各部位に相当する第1クラッド部の屈折率、領域563は、図1Aに示された第3クラッド4の線L上の各部位に相当する第2クラッド部の屈折率を示している。したがって、この比較例である分散補償ファイバは、屈折率 n_1 、外径 $2a$ を有するコア部と、該コア部の外周に設けられ、屈折率 n_2 ($<n_1$)、外径 $2d$ を有する第1クラッド部と、該第1クラッド部の外周に設けられた屈折率 n_3 ($>n_2$ 、 $<n_1$) の第2クラッド部とを備えている。また、図11中に示された Δ_1 は上記第2クラッド部に対するコア部の比屈折率差であり、 Δ_2 は上記第2クラッド部に対するコア部の比屈折率差 Δ_2 である。

次に、図12のグラフCa～Ceは、 Δ_1 の値を変化させたときの、分散とコア外径 $2a$ との関係を示し、図13のグラフBa～Beは、 Δ_1 の値を変化させたときの、分散と直径40mmでの曲げ損失との関係を示している。なお、これらのグラフの添字a～eは、 Δ_2 が-0.67%、 Δ_3 が0.147%、 $2a/2c$ が0.125、 $2a/2b$ が0.25、 $2b/2c$ が0.5に、それぞれ固定され、 Δ_1 が(a) 1.83、(b) 2.13、(c) 2.42、(d) 2.71、及び(e) 2.99に設定されている場合に対応している。

比屈折率差 Δ_1 を低くすることで、分散の負のピーク値を大きくとることができる、これによってピークからコア外径 $2a$ の大きい領域での分散スロープを大きくとることができる。また、曲げ損失の観点からは、同じ分散値に対して Δ_1 を高くした方が望ましい。これら逆方向の効果のバランスから、最適な Δ_1 の値を導くことができる。

図14のグラフCa～Ceは、 $2a/2b$ の値を変化させたときの、分散とコア外径 $2a$ の関係を示しており、図15のグラフBa～Beは、 $2a/2b$ の値

を変化させたときの、分散と直径40mmでの曲げ損失の関係を示している。なお、これらのグラフの添字a～eは、 Δ_1 が2.51%、 Δ_2 が0.67%、 Δ_3 が0.147%、 $2a/2c$ が0.125に、それぞれ固定され、 $2a/2b$ が
5 (a) 0.231、(b) 0.242、(c) 0.250、(d) 0.263及び
(e) 0.273に設定された場合に対応している。

特に、 $2a/2b$ を小さくすることによって分散の負のピーク値を大きくすることが可能であるが、比屈折率差 Δ_1 を変化させた場合と同様に、曲げ損失と逆方向の効果の関係にある。

さらに、図16のグラフCa～Cfは、 $2a/2c$ の値を変化させたときの、
10 分散とコア外径2aの関係を示し、図17のグラフBa～Bfは、 $2a/2c$ の
値を変化させたときの、分散と直径40mmでの曲げ損失の関係を示している。
なお、これらのグラフの添字a～fは、 Δ_1 が2.51%、 Δ_2 が-0.67%
、 Δ_3 が0.147%、 $2a/2b$ が0.25に、それぞれ固定され、 $2a/2c$
15 cが(a) 0.101、(b) 110、(c) 0.117、(d) 0.125、(e)
(f) 0.133及び(f) 0.156に設定された場合に対応している。

この $2a/2c$ が大きくなった場合と小さくなった場合の双方において、分散
の負のピーク値は大きくなる傾向がある。一方、曲げ損失の分散値依存性を考慮
すると、 $2a/2c$ が小さくなった場合に曲げ損失の改善効果が大きいことから
、 $2a/2c$ の値は小さくした方が望ましい。このとき、カットオフ波長 λ_c が
20 あまり長波長にならないように、最適な値を選択することが必要である。

このような分散補償ファイバと、分散シフトファイバからなる光伝送システム
について、分散の波長依存性を示すグラフが図18及び図19に示されている。
分散補償ファイバの各パラメータとしては、 Δ_1 が2.51%、 Δ_2 が-0.6
7%、 Δ_3 が0.147%、 $2a/2c$ が0.11、 $2a/2b$ が0.25、 $2b/2c$ が0.44に、それぞれ設定されている。また、図18に示された分散
25 の波長依存性を有する光伝送システムでは、補償対象として、1.536 μm の

零分散波長及び $0.066 \text{ ps/nm}^2/\text{km}$ の分散スロープを有する分散シフトファイバが想定されており、図19に示された光伝送システムでは、補償対象として、 $1.552 \mu\text{m}$ の零分散波長及び $0.075 \text{ ps/nm}^2/\text{km}$ の分散スロープを有する分散シフトファイバが想定されている。いずれの場合においても、波長 $1.57 \sim 1.60 \mu\text{m}$ の範囲で、低い分散値が実現されている。

上記のような分散補償ファイバ及び分散シフトファイバが適用された、 $1.58 \mu\text{m}$ 波長帯のWDM伝送を行うための光伝送システムの構成例が図20及び図21に示されている。図20の光伝送システムでは、送信器400と受信器500との間の伝送路中に、2つの中継増幅器600（ $1.58 \mu\text{m}$ 波長帯用のEDFA : Erbium-doped fiber amplifier）が設置され、これら中継増幅器600の間に、長さ 94 km の分散シフトファイバ200と、その分散及び分散スロープを補償する長さ 1 km の分散補償ファイバ100が設置されている。

また、図21の光伝送システムでは、送信器400と受信器500間の伝送路中に、前置増幅器700と後置増幅器800が設置され、これら前置及び後置増幅器700、800の間には、複数の中継増幅器600（図では4個）が設置されている。各中継増幅器600の間には、それぞれ長さ 80 km の分散シフトファイバ200が設置されている。一方、後置増幅器800及び受信器500の間には、長さ 4.8 km の分散補償ファイバ100が設置され、当該光伝送システムにおける分散及び分散スロープの補償が行われる。なお、これらの光伝送システムにおいては、送信器400として例えば $1.56 \sim 1.61 \mu\text{m}$ 8波多重の送信器が用いられる。

なお、図20及び図21に示された各光伝送システムの説明において、各ファイバの長さ等については一例であって、これらの長さ等は、それぞれのファイバの特性によって、分散補償等が実現されるように適宜設定されるものである。

産業上の利用可能性

以上のようにこの発明に係る分散補償ファイバによれば、分散シフトファイバに対する分散補償を行う分散補償ファイバに3重クラッド構造を採用し、その各部の屈折率及び外径を最適化することによって、分散補償を行ったときに同時に分散スロープをも十分に補償することができる。

- 5 また、コア部の比屈折率差 Δ_1 等が分散の絶対値が十分に大きくなるように設定されているので、分散補償に必要な分散補償ファイバの長さ（補償対象である分散シフトファイバとの長さ比）を短くし、かつ、曲げ損失を十分小さくすることができる。この結果、当該分散補償ファイバをコイル状に巻いてモジュールを構成するときに、該モジュールを小型化することが可能となるとともに、効率的な分散及び分散スロープの補償が実現できる。
- 10

請求の範囲

1. 1. 5 μm 波長帯に零分散波長を有する所定長の分散シフトファイバの分散を補償する分散補償ファイバであって、

5 所定の基準軸に沿って伸びた、外径 $2a$ のコアを有するコア領域と、

前記コア領域の外周に設けられた領域であって、前記コアの外周に設けられた外径 $2b$ の第1クラッドと、該第1クラッドの外周に設けられた外径 $2c$ の第2クラッドと、該第2クラッドの外周に設けられた第3クラッドとを有するクラッド領域とを備え、

10 前記コアの屈折率 n_1 、前記第1クラッドの屈折率 n_2 、前記第2クラッドの屈折率 n_3 、前記第3クラッドの屈折率 n_4 は、

$n_1 > n_3 > n_4 > n_2$ であり、

前記第3クラッドに対する前記コア及び前記第1クラッドの各比屈折率差 Δ_1 及び Δ_2 は、

15 $1\% \leq \Delta_1 \leq 3\%$

$\Delta_2 \leq -0.4\%$ であり、

前記第2クラッドの外径に対する前記コアの外径の比は、

$2a/2c \leq 0.3$ であり、

前記所定長の分散シフトファイバと、該分散シフトファイバの分散を補償する
20 のに十分な長さを有する当該分散補償ファイバとが光学的に接続されることにより光伝送システムが構成されるとき、当該分散補償ファイバは、使用波長帯域内の信号波長のうち最小波長の光及び最大波長の光に対して、該光伝送システムにおける全分散スロープの絶対値を $0.024 \text{ ps/nm}^2/\text{km}$ 以下にすることを特徴とする分散補償ファイバ。

25 2. 使用波長帯域内の信号波長のうち最小波長の光及び最大波長の光に対して、前記光伝送システムにおける全分散スロープの絶対値を 0.012 ps/n

m^2/km 以下にすることを特徴とする請求項 1 記載の分散補償ファイバ。

3. 1. $5\mu m$ 波長帯に零分散波長を有する所定長の分散シフトファイバの分散を補償する分散補償ファイバであって、

所定の基準軸に沿って伸びた、外径 $2a$ のコアを有するコア領域と、

5 前記コア領域の外周に設けられた領域であって、前記コアの外周に設けられた外径 $2b$ の第 1 クラッドと、該第 1 クラッドの外周に設けられた外径 $2c$ の第 2 クラッドと、該第 2 クラッドの外周に設けられた第 3 クラッドとを有するクラッド領域とを備え、

10 前記コアの屈折率 n_1 、前記第 1 クラッドの屈折率 n_2 、前記第 2 クラッドの屈折率 n_3 、前記第 3 クラッドの屈折率 n_4 は、

$$n_1 > n_3 > n_4 > n_2 \quad \text{であり、}$$

前記第 3 クラッドに対する前記コア及び前記第 1 クラッドの各比屈折率差 Δ_1 及び Δ_2 は、

$$1\% \leq \Delta_1 \leq 3\%$$

15 $\Delta_2 \leq -0.4\% \quad \text{であり、}$

前記第 2 クラッドの外径に対する前記コアの外径の比は、

$$2a/2c \leq 0.3 \quad \text{であり、}$$

前記所定長の分散シフトファイバの分散を補償するのに十分な長さを有することを特徴とする分散補償ファイバ。

20 4. 当該分散補償ファイバの長さ L_{DCF} は、使用波長帯域内の信号波長のうち波長 λ_m の光に対して、以下の条件を満たすことを特徴とする請求項 1 又は 3 記載の分散補償ファイバ：

$$|D_{DSF}(\lambda_m) \cdot L_{DSF} + D_{DCF}(\lambda_m) \cdot L_{DCF}| \leq 200 \text{ ps/nm}$$

ここで、

25 $D_{DSF}(\lambda_m)$: 波長 λ_m における分散シフトファイバの分散

L_{DSF} : 分散シフトファイバの長さ

$D_{DCF}(\lambda_m)$: 波長 λ_m における当該分散補償ファイバの分散

L_{DCF} : 当該分散補償ファイバの長さ。

5. 当該分散補償ファイバの長さ L_{DCF} は、使用波長帯域内の全ての信号波長 λ_{all} の光に対して、以下の条件を満たすことを特徴とする請求項4記載の分散補償ファイバ:

$$|D_{DSF}(\lambda_{all}) \cdot L_{DSF} + D_{DCF}(\lambda_{all}) \cdot L_{DCF}| \leq 200 \text{ ps/nm}$$

ここで、

10 $D_{DSF}(\lambda_{all})$: 全ての使用波長 λ_{all} における分散シフトファイバの分散

L_{DSF} : 分散シフトファイバの長さ

$D_{DCF}(\lambda_{all})$: 全ての使用波長 λ_{all} における当該分散補償ファイバの分散

L_{DCF} : 当該分散補償ファイバの長さ。

- 15 6. 前記第3クラッドに対する前記コアの比屈折率差 Δ_1 は、以下の条件を満たすことを特徴とする請求項1又は3記載の分散補償ファイバ:

$$1\% \leq \Delta_1 \leq 2\%。$$

7. 前記第3クラッドに対する前記コアの比屈折率差 Δ_1 は、以下の条件を満たすことを特徴とする請求項1又は3記載の分散補償ファイバ:

20 $2\% \leq \Delta_1 \leq 3\%。$

8. 前記第3クラッドに対する前記第2クラッドの比屈折率差 Δ_3 は、以下の条件を満たすことを特徴とする請求項1又は3記載の分散補償ファイバ:

$$\Delta_3 \geq 0.1\%。$$

- 25 9. 前記第1クラッドの外径に対する前記コアの外径の比は、以下の条件を満たすことを特徴とする請求項1又は3記載の分散補償ファイバ:

$$0.2 \leq 2a/2b \leq 0.5。$$

10. 波長 $1.55\ \mu\text{m}$ の光に対して、 $10\ \text{dB}/\text{m}$ 以下の直径 $60\ \text{mm}$ での曲げ損失、 $0.5\ \text{ps} \cdot \text{km}^{-1/2}$ 以下の偏波モード分散、 $1\ \text{dB}/\text{km}$ 以下の伝送損失を有することを特徴とする請求項 1 又は 3 記載の分散補償ファイバ。

5 11. $1.5\ \mu\text{m}$ 波長帯に零分散波長を有する所定長の分散シフトファイバと、

請求項 1 又は 3 記載の分散補償ファイバとを備えた光伝送システムであって、
使用波長帯域内の信号波長のうち最小波長の光及び最大波長の光に対して、その絶対値が $0.024\ \text{ps}/\text{nm}^2/\text{km}$ 以下である全分散スロープを有することを特徴とする光伝送システム。

10 12. 使用波長帯域内の信号波長のうち最小波長の光及び最大波長の光に対して、前記光伝送システムにおける全分散スロープの絶対値が $0.012\ \text{ps}/\text{nm}^2/\text{km}$ 以下であることを特徴とする請求項 11 記載の光伝送システム。

図1A

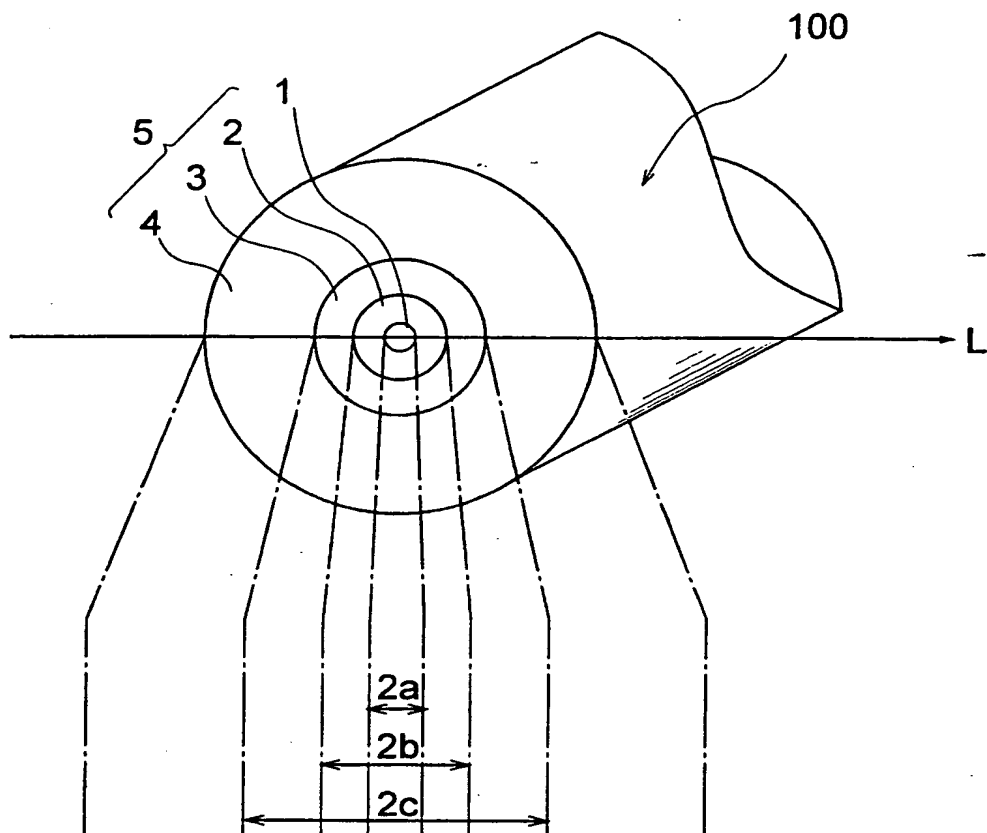
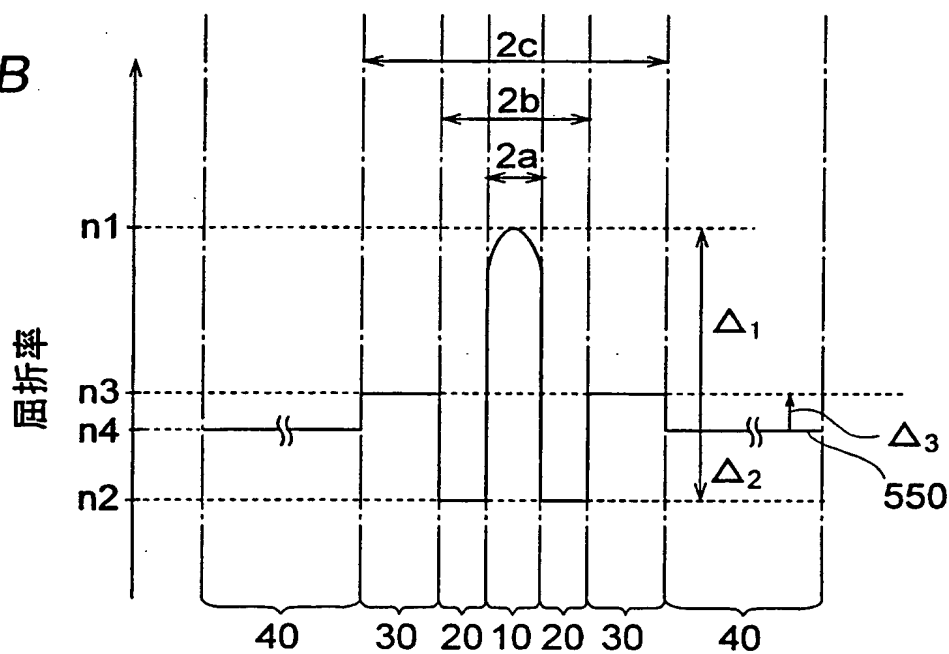


図1B



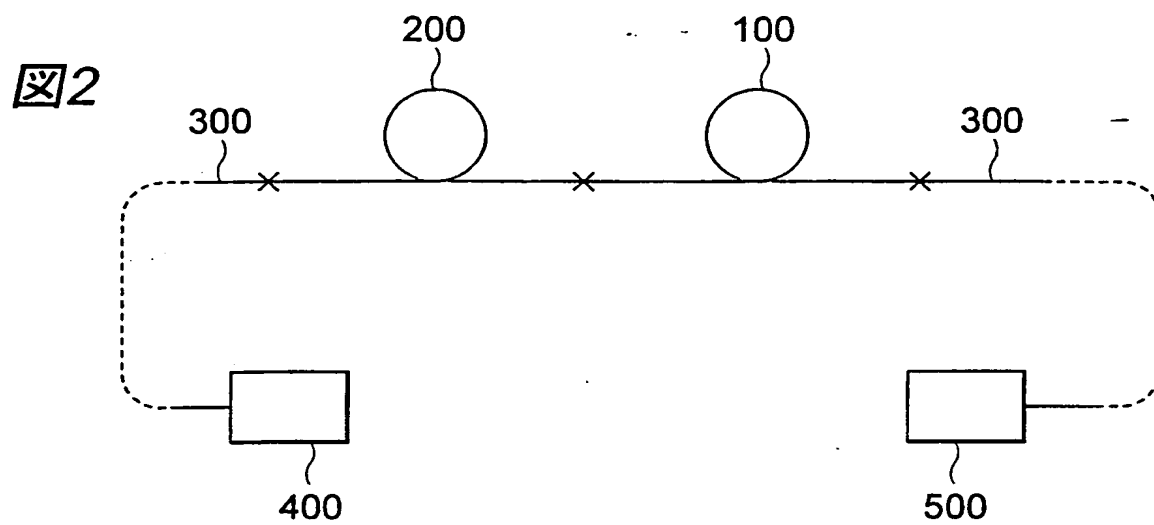


図3A

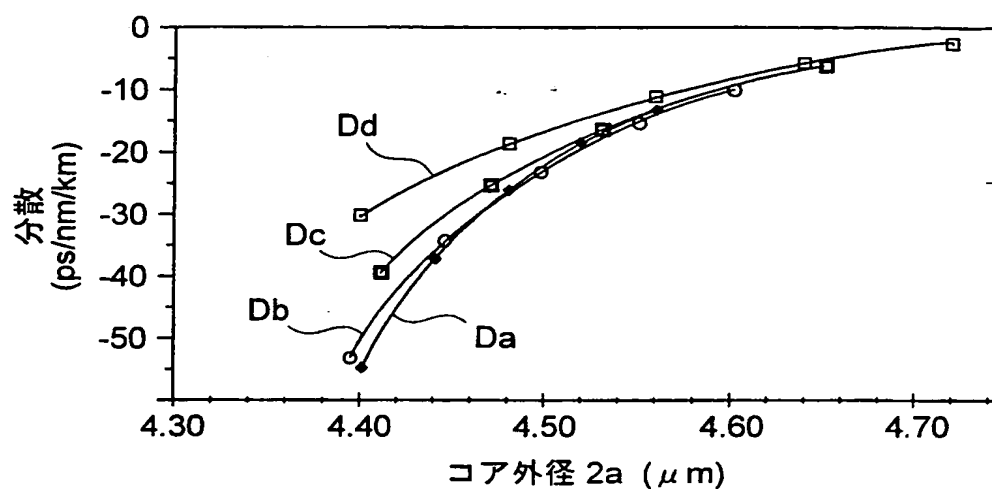


図3B

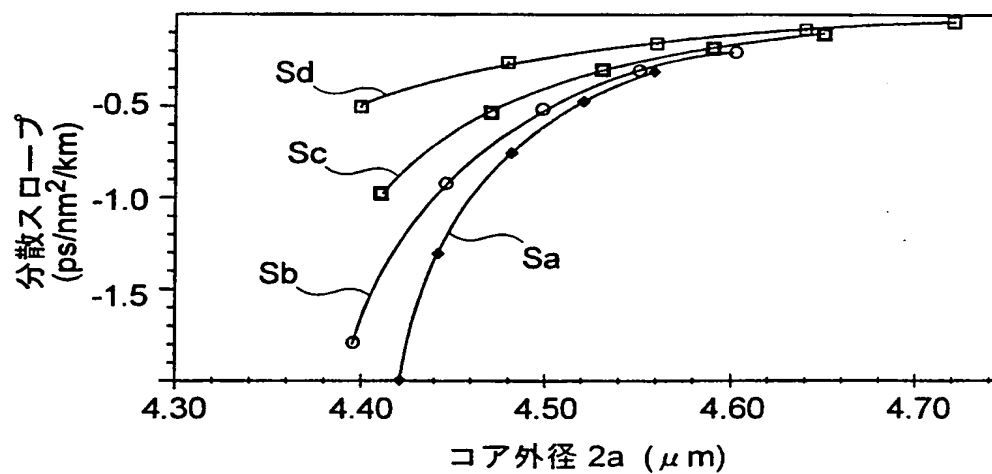


図3C

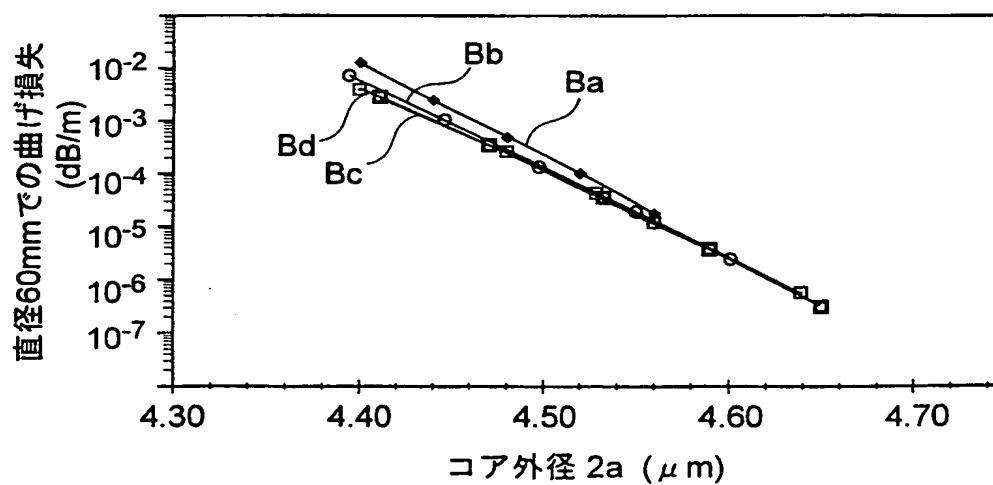


図4

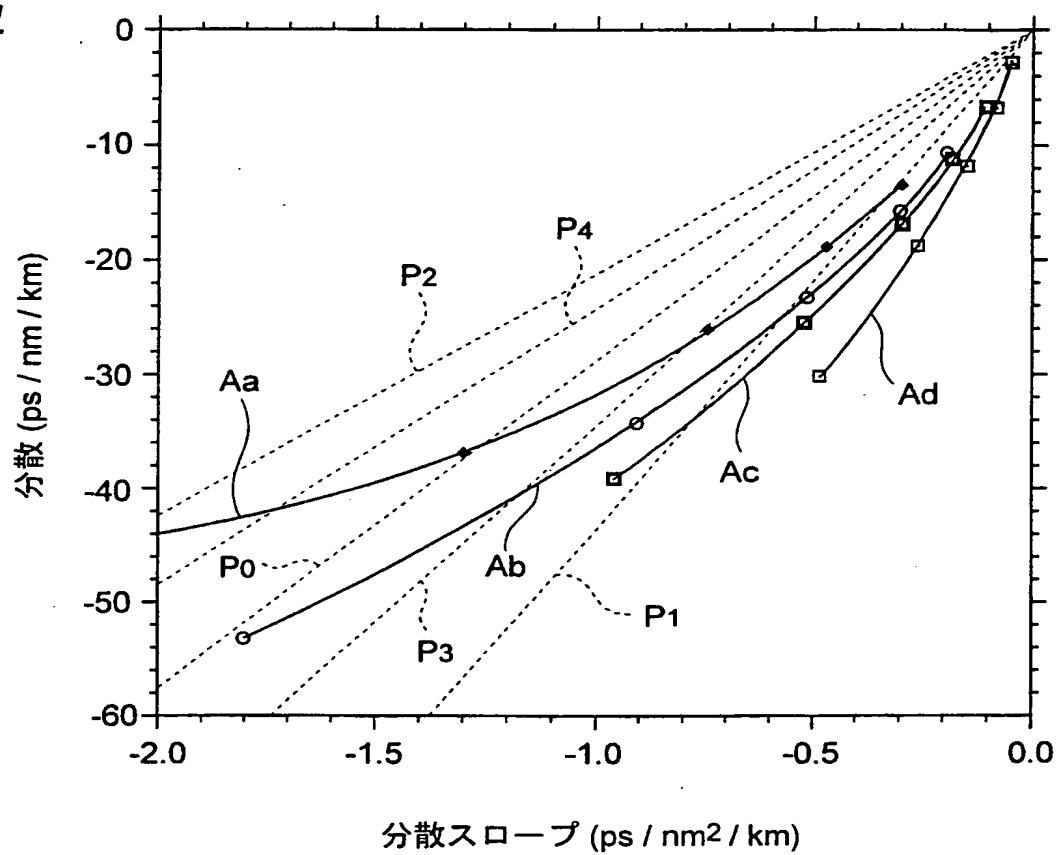


図5A

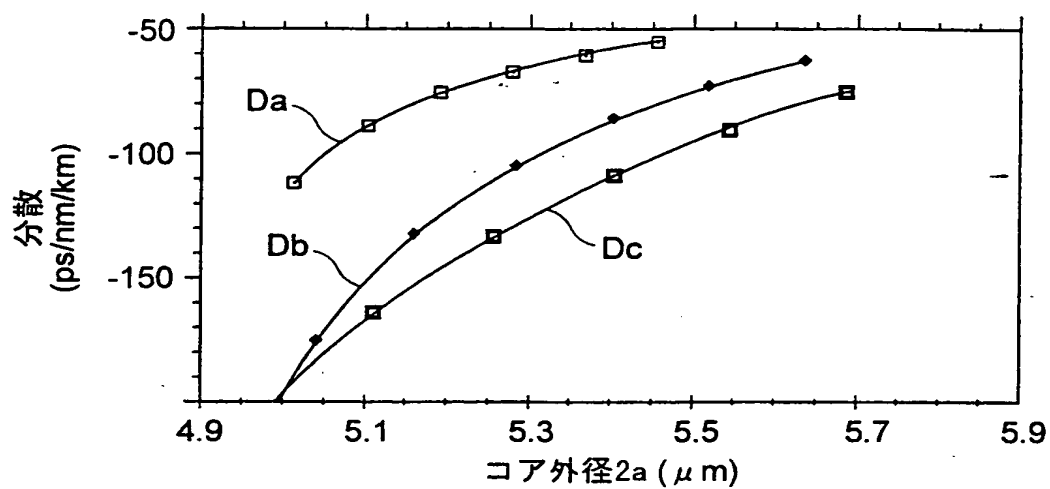


図5B

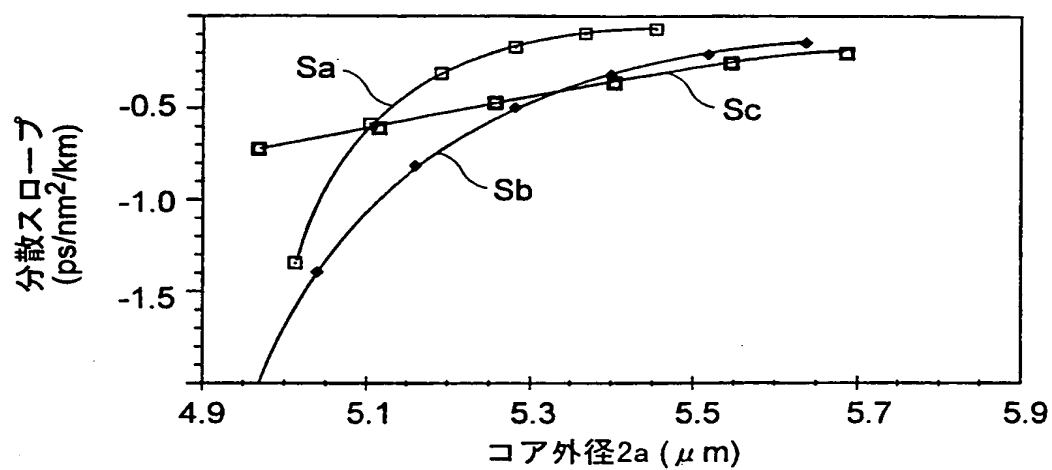


図5C

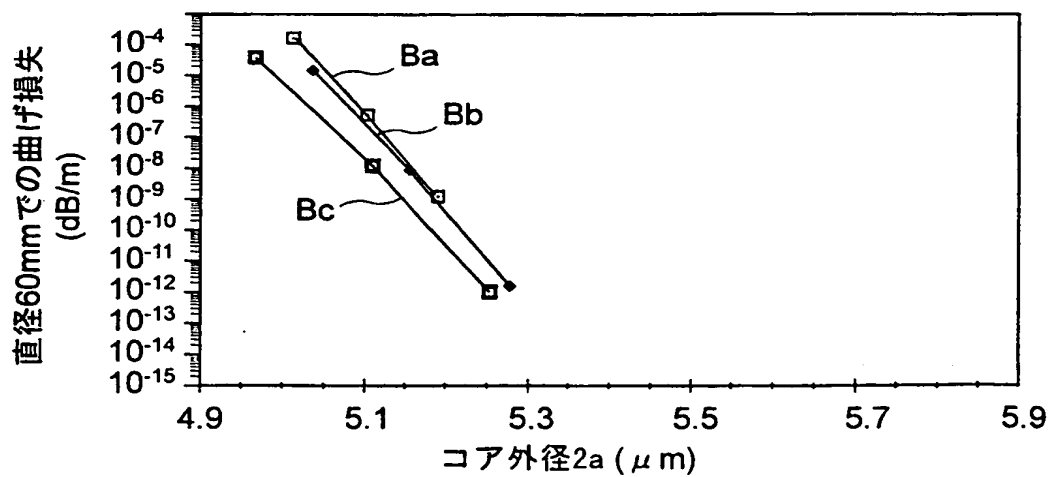


図6

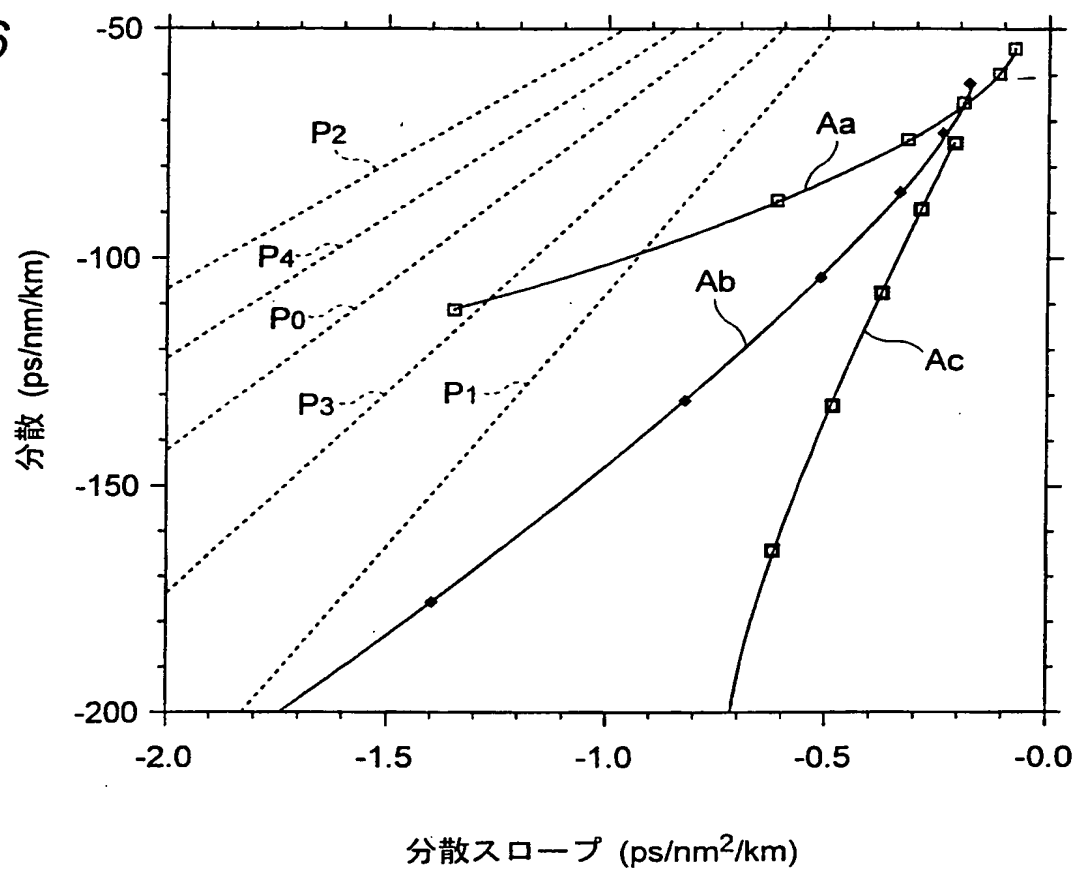


図7

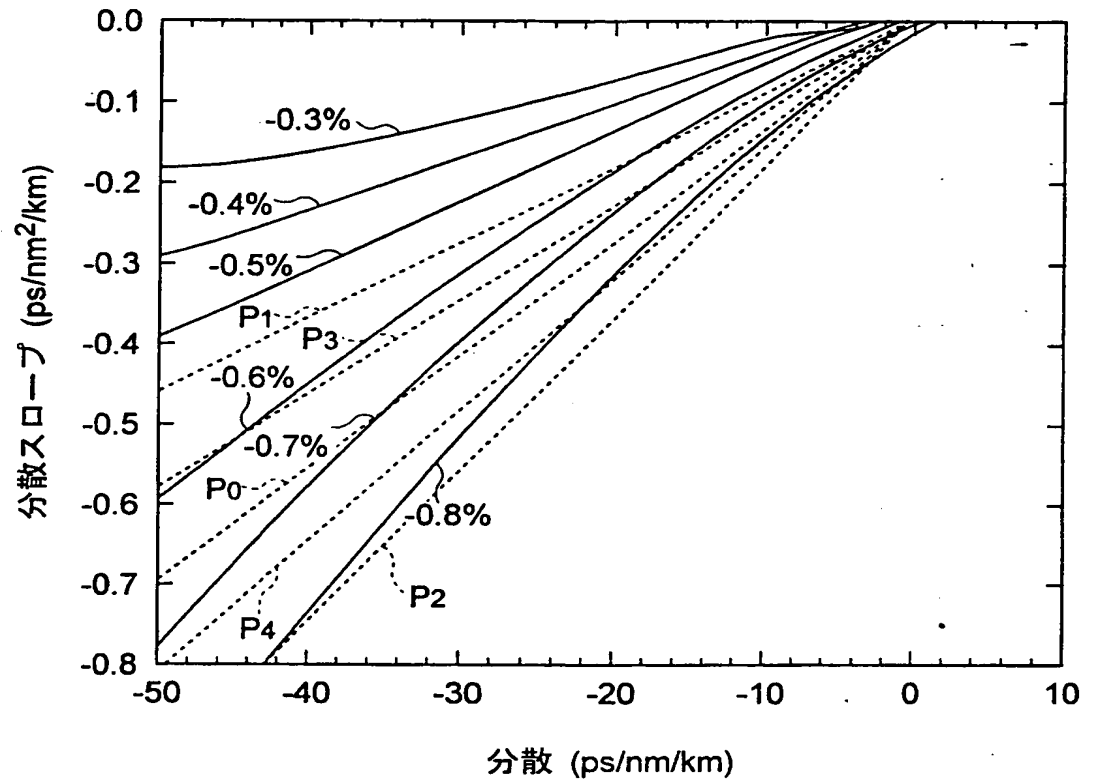


図8A

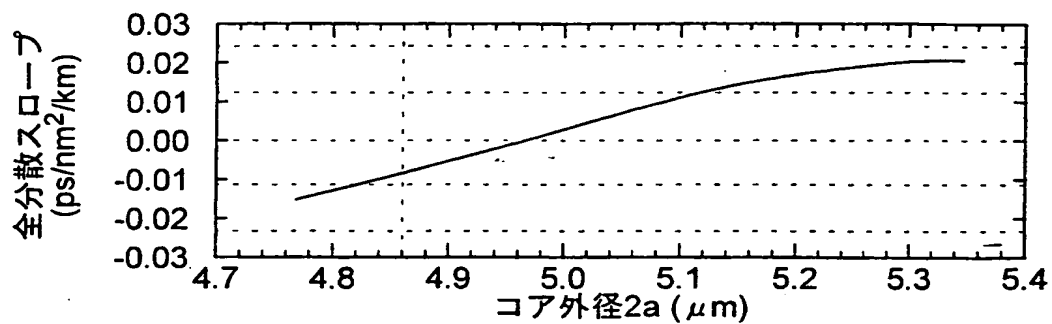


図8B

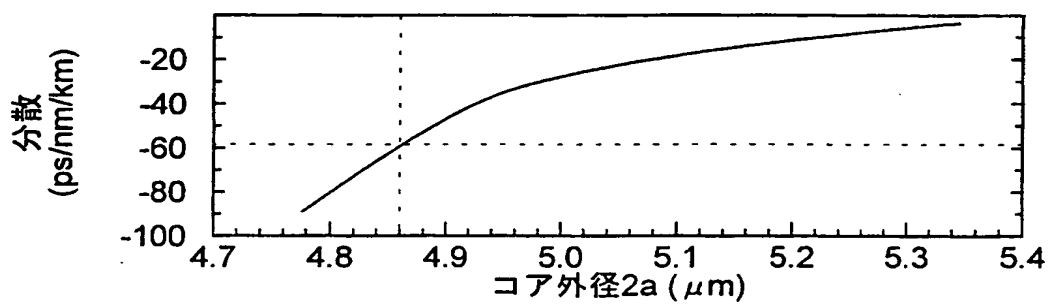


図8C

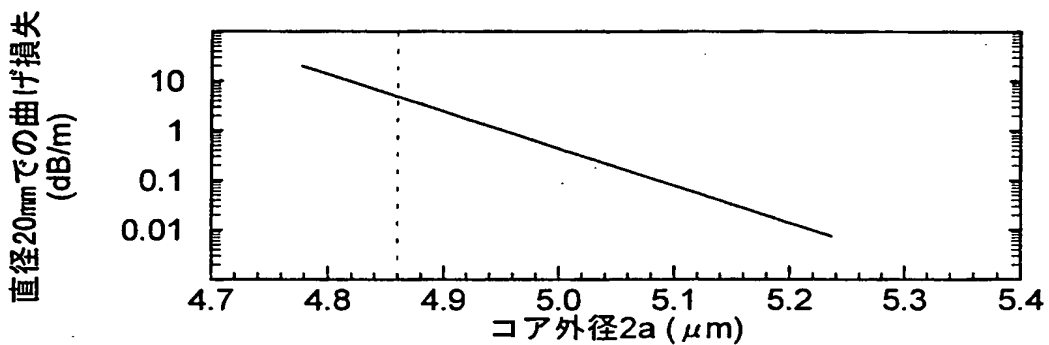


図8D

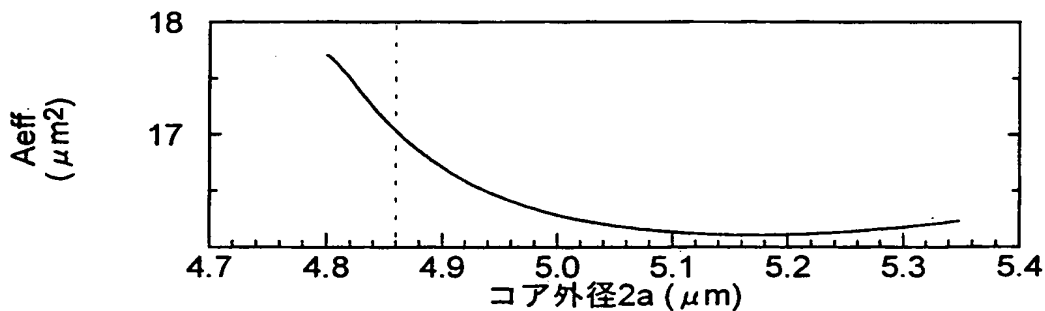


図8E

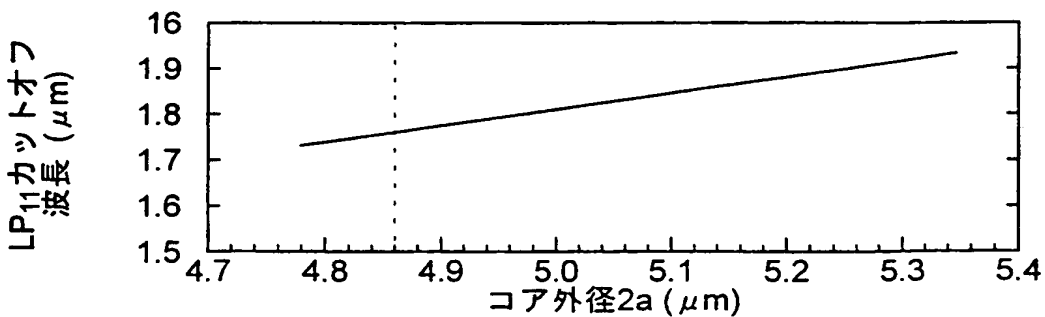


図9

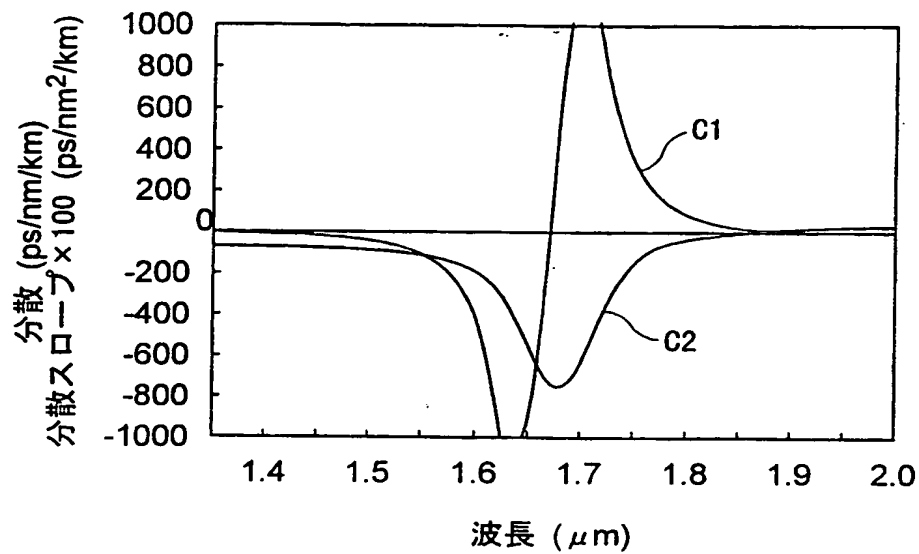


図10

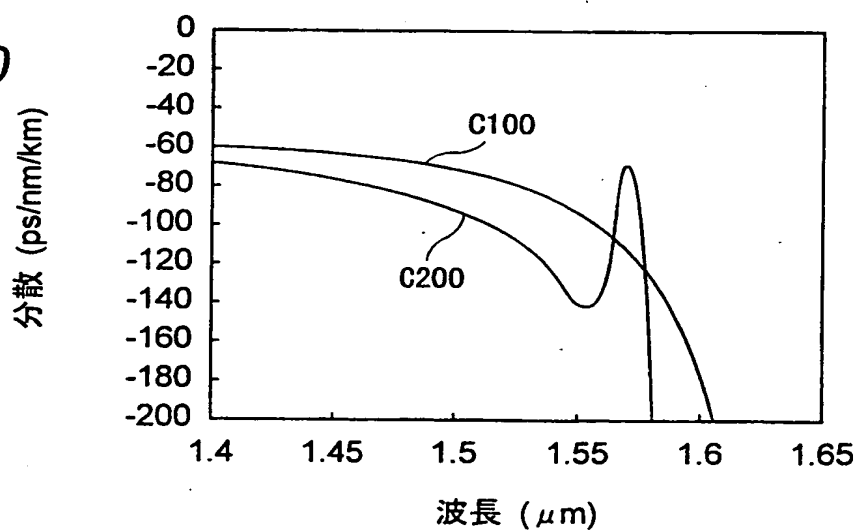


図 11

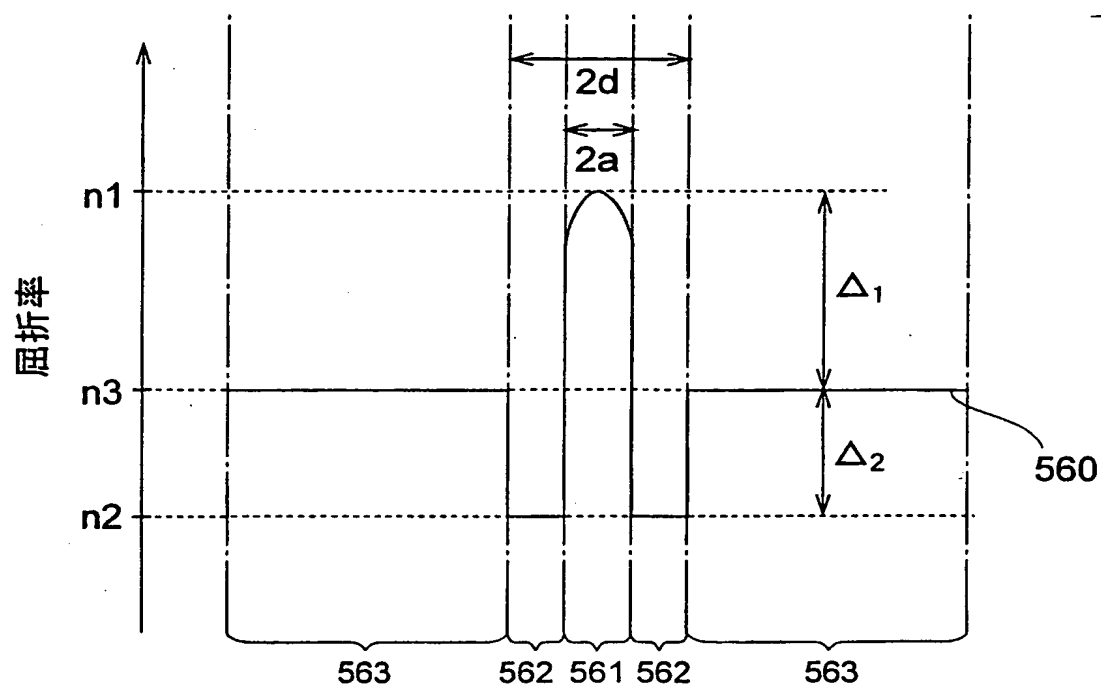


図12

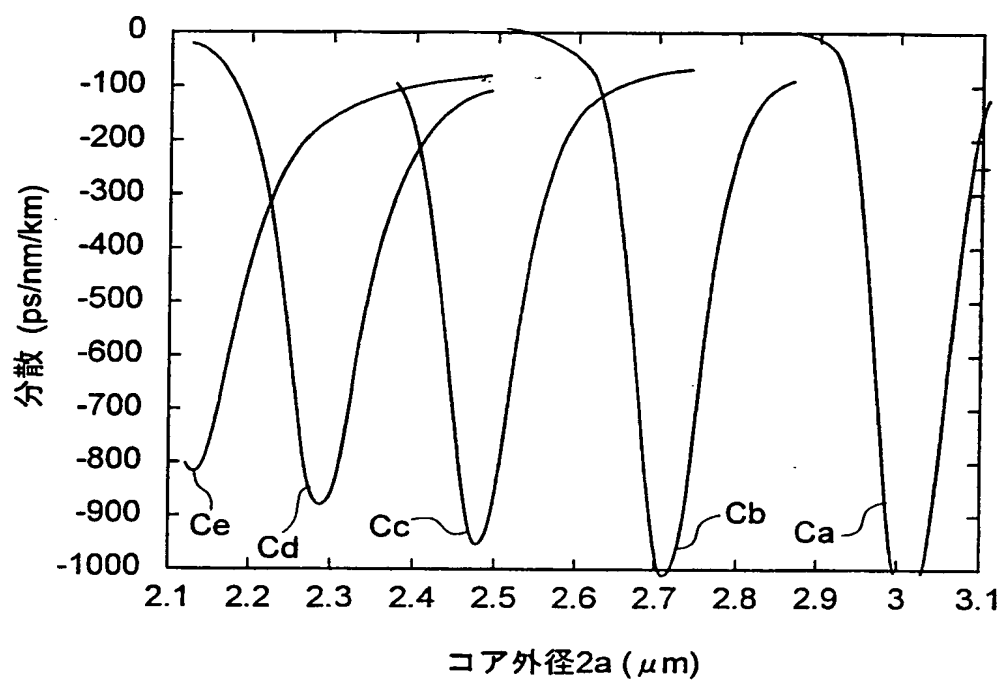


図13

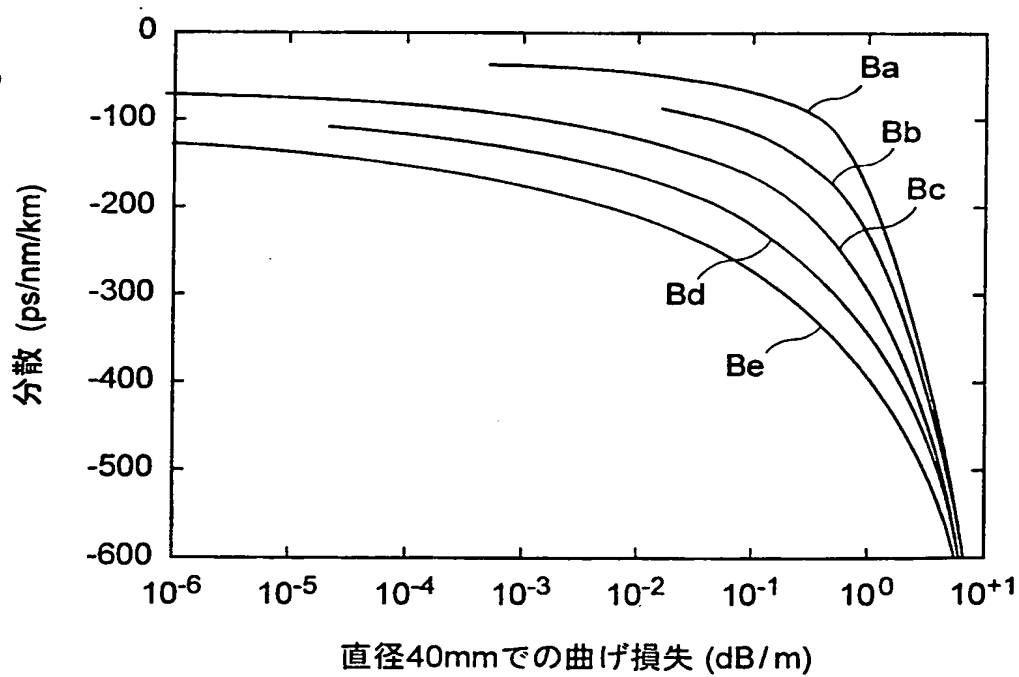


図14

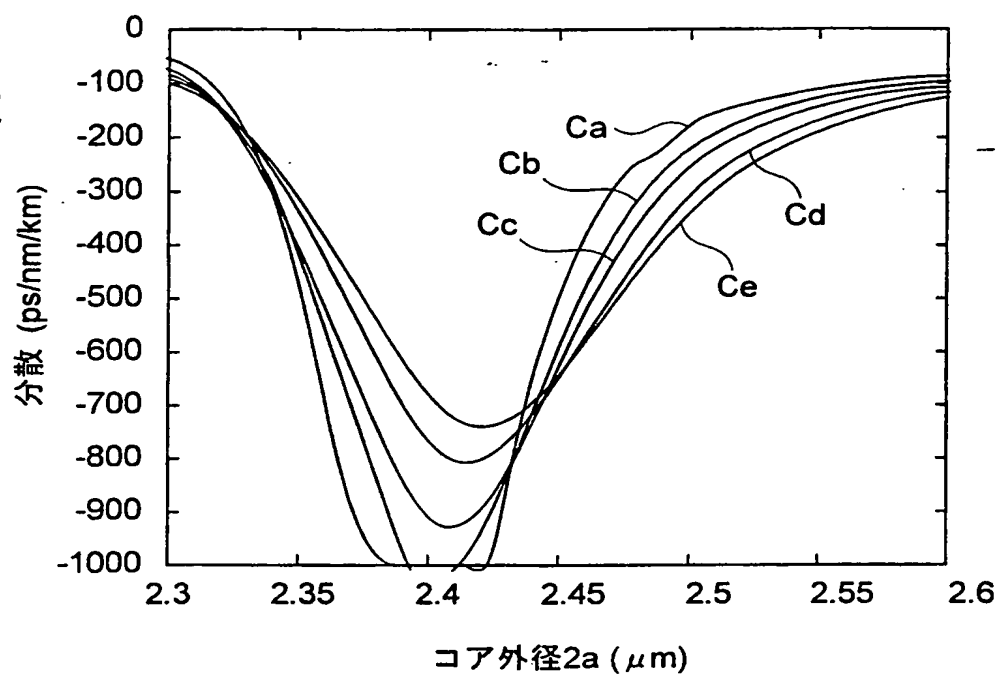


図15

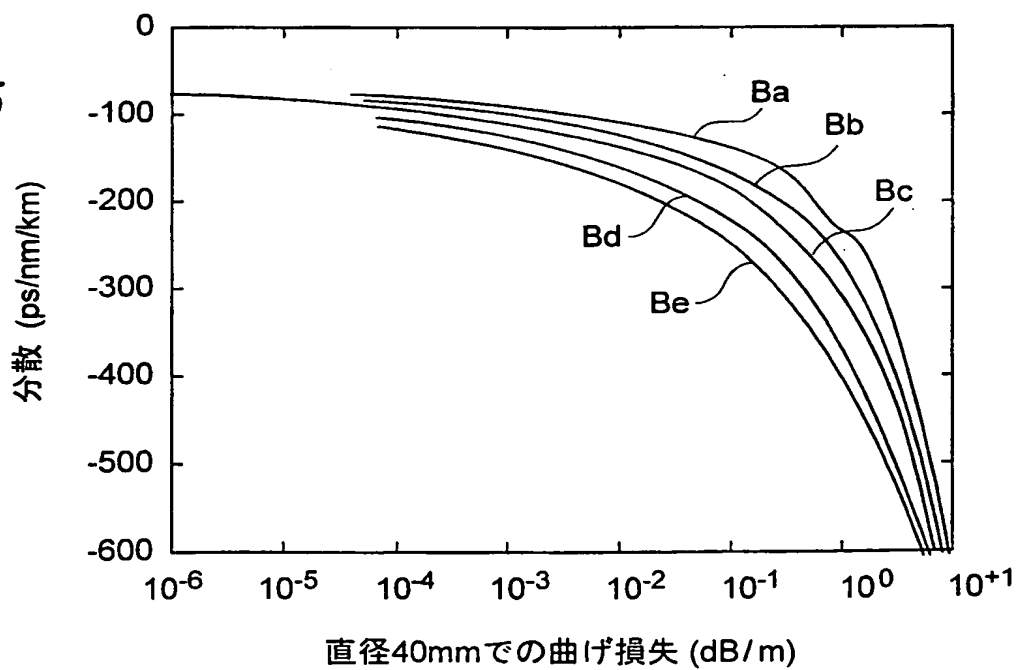


図16

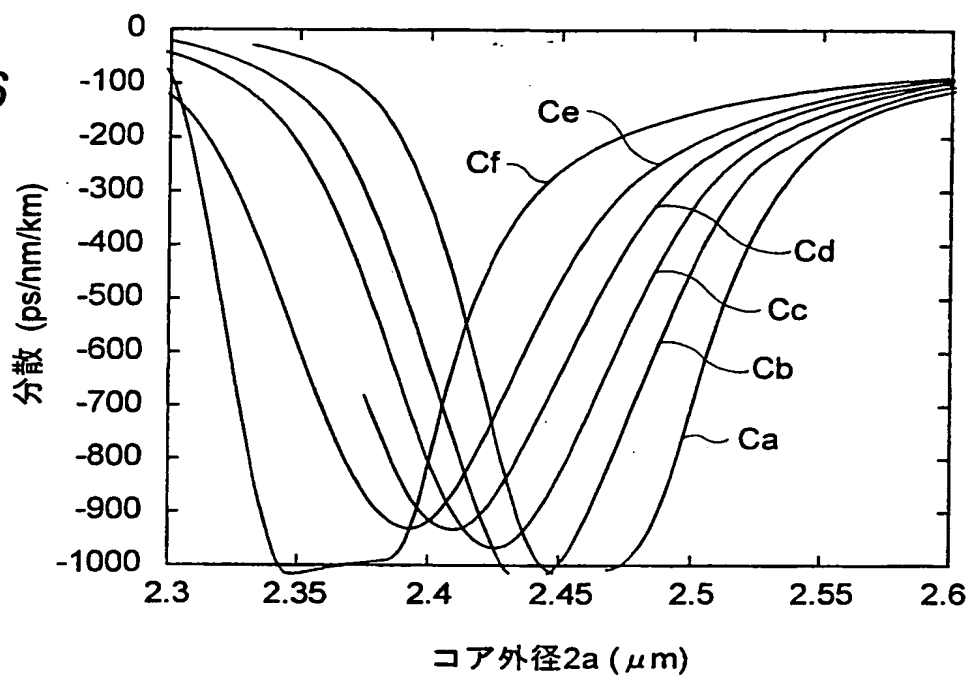


図17

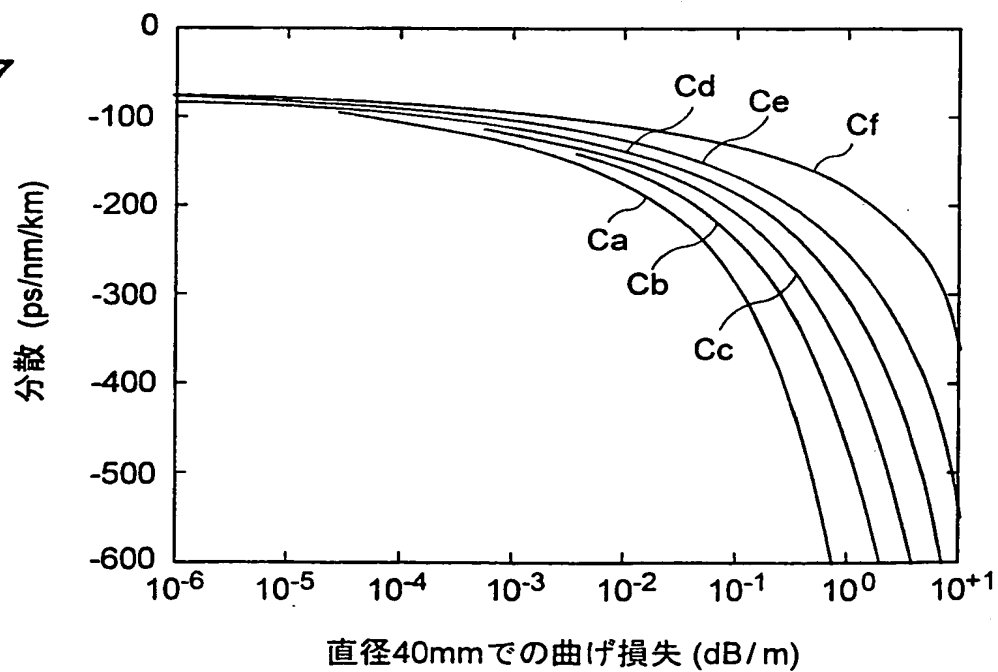


図18

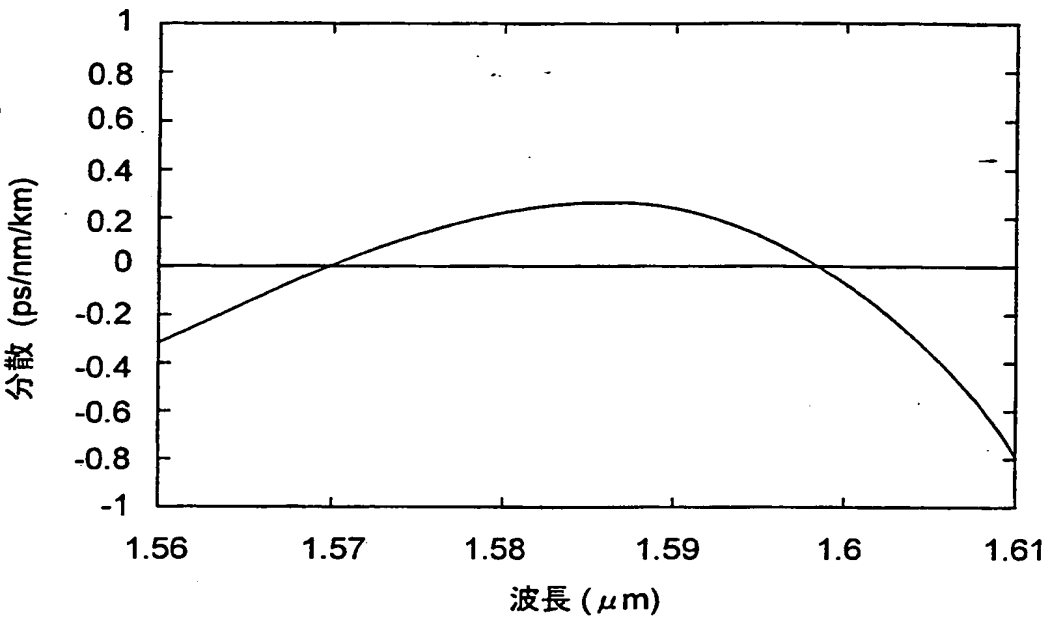


図19

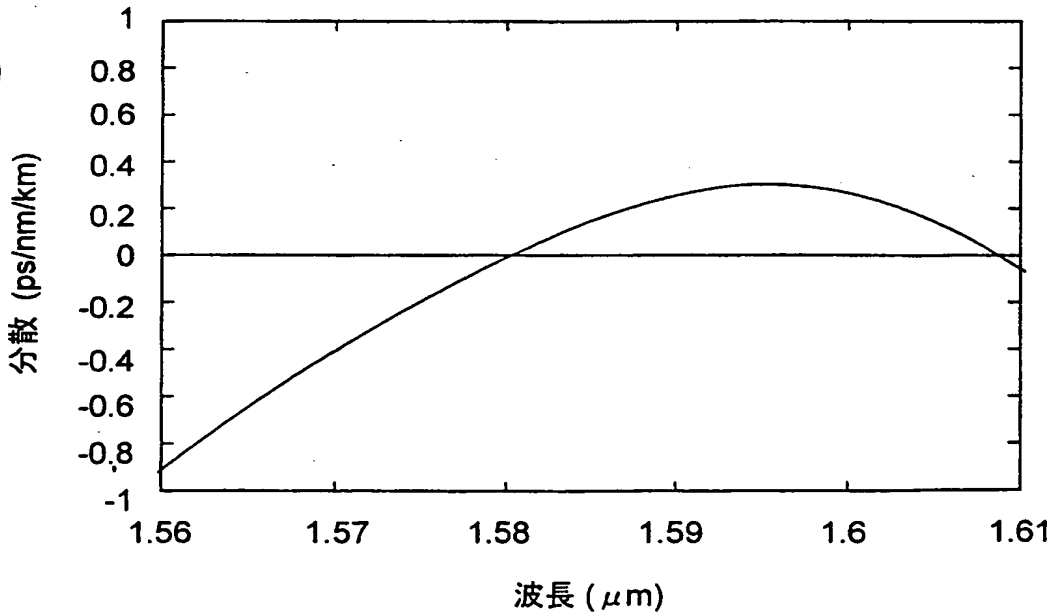


図20

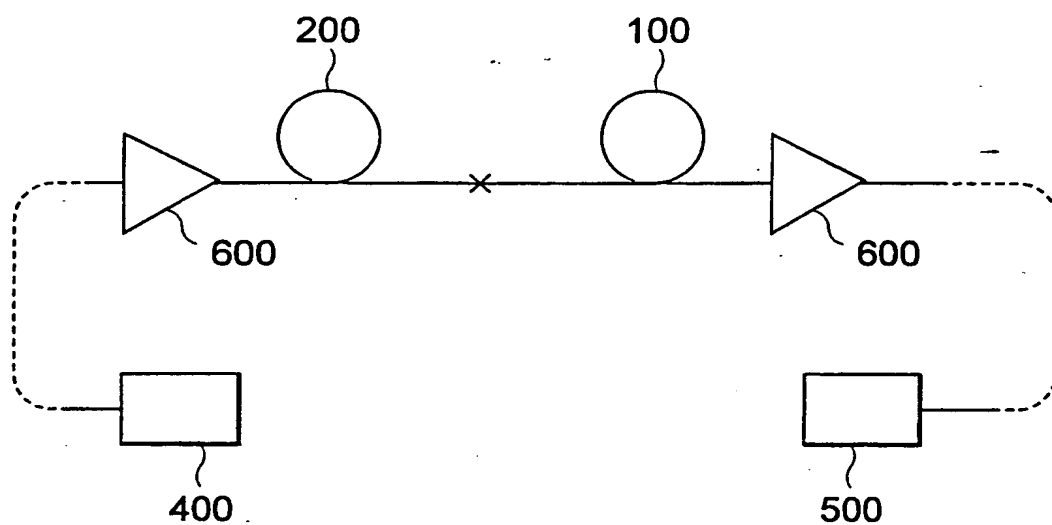
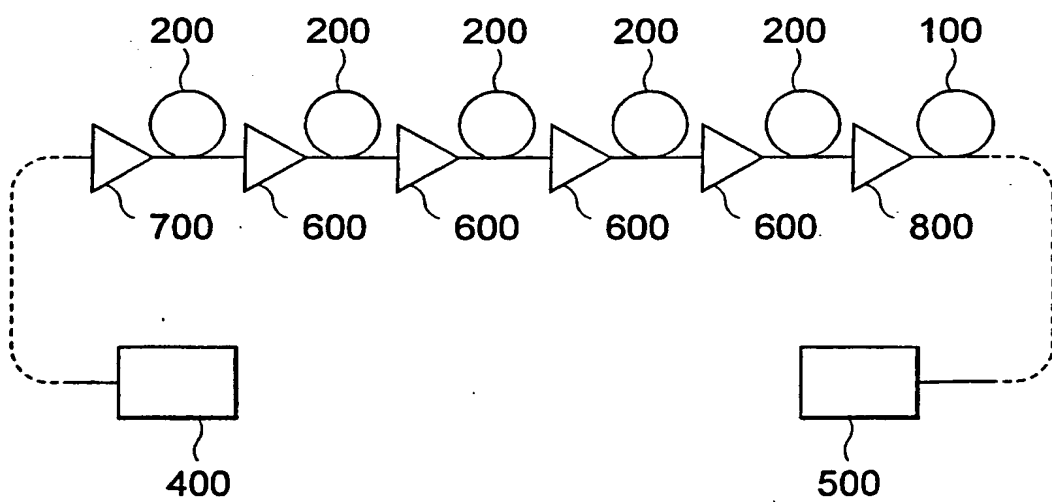


図21



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No. -

PCT/JP99/04413

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

Int.Cl⁶ G02B 6/16, 6/22

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

Int.Cl⁶ G02B 6/00-6/54

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Jitsuyo Shinan Koho 1926-1996 Toroku Jitsuyo Shinan Koho 1994-1999
 Kokai Jitsuyo Shinan Koho 1971-1999 Jitsuyo Shinan Toroku Koho 1996-1999

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y	JP, 10-39155, A (Sumitomo Electric Industries, Ltd.), 13 February, 1998 (13.02.98), Full text & CA, 2202586, A & US, 5838867, A	1-12
Y	JP, 9-127354, A (Sumitomo Electric Industries, Ltd.), 16 May, 1997 (16.05.97), Full text; especially, Par. No. [0039]; Figs. 1, 5-6, 9 & EP, 762159, A2 & US, 5740297, A	1-12
A	Nielsen L G et al., "Large volume manufacturing of dispersion-compensating fibers", OFC '98 Technical Digest, JICST, 29 May, 1998, pp. 24-25, especially, Fig. 1, Table 1	1-12
A	M. Onishi et al., "Third-order dispersion compensating fibres for non-zero dispersion shifted fibre links", ELECTRONICS LETTERS, Vol. 36, No. 25 (5th December 1996), pp.2344-2345	1-12

☒ Further documents are listed in the continuation of Box C.
 ☐ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:	"I" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention
"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance	"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone
"E" earlier document but published on or after the international filing date	"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art
"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)	"&" document member of the same patent family
"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means	
"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed	

 Date of the actual completion of the international search
 09 November, 1999 (09.11.99)

 Date of mailing of the international search report
 16 November, 1999 (16.11.99)

 Name and mailing address of the ISA/
 Japanese Patent Office

Authorized officer

Facsimile No.

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No. -

PCT/JP99/04413

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	JP, 10-221562, A (Lucent Technologies Inc.), 21 August, 1998 (21.08.98) & EP, 859481, A & US, 5181673, A	1-12
A	JP, 8-313750, A (The Furukawa Electric Co., Ltd.), 29 November, 1996 (29.11.96), Par. No. [0011] & CA, 2170815, A & US, 5673354, A	1-12
A	JP, 8-136758, A (The Furukawa Electric Co., Ltd.), 31 May, 1996 (31.05.96), Fig. 5 & CA, 2157828, A & US, 5568583, A	1-12
A	JP, 7-270636, A (AT & T Corporation), 20 October, 1995 (20.10.95) & EP, 668520, A2 & US, 5448674, A	1-12
A	JP, 6-222235, A (American Telephone & Telegraph Company), 12 August, 1994 (12.08.94) & EP, 598554, A1	1-12
A	JP, 6-11620, A (Corning Inc.), 21 January, 1994 (21.01.94) & EP, 554714, A1 & CA, 2084217, A & US, 5361319, A	1-12
P,X	JP, 10-319266, A (Fujikura Ltd.), 04 December, 1998 (04.12.98), Full text; especially, Par. No. [0030]; Table 1; Fig. 1, 2 (Family: none)	3
P,A	T. Tsuda et al., "BROAD BAND DISPERSION SLOPE COMPENSATION OF DISPERSION SHIFTED FIBER USING NEGATIVE SLOPE FIBER", ECOC '98 (20-24 September 1998), Vol. 1, pp. 233-234	1-12

A. 発明の属する分野の分類 (国際特許分類 (IPC))
Int. Cl⁶ G02B 6/16, 6/22

B. 調査を行った分野
調査を行った最小限資料 (国際特許分類 (IPC))
Int. Cl⁶ G02B 6/00-6/54

最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの

日本国実用新案公報 1926-1996年
日本国公開実用新案公報 1971-1999年
日本国登録実用新案公報 1994-1999年
日本国実用新案登録公報 1996-1999年

国際調査で使用した電子データベース (データベースの名称、調査に使用した用語)

C. 関連すると認められる文献

引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求の範囲の番号
Y	J P, 10-39155, A (住友電気工業株式会社), 13. 2月. 1998 (13. 02. 98), 全文. & CA, 2202586, A&US, 5838867, A	1-12
Y	J P, 9-127354, A (住友電気工業株式会社), 16. 5月. 1997 (16. 05. 97), 全文. 特に, 第39段落, 第1図, 第5-6図, 第9図参照 & EP, 762159, A2&US, 5740297, A	1-12
A	Nielsen L G et al.: "Large volume manufacturing of dispersio n-compensating fibers"; OFC '98 Technical Digest, 日本学術 情報センター (J I C S T) 1998年5月29日受入, pp. 24-2	1-12

☒ C欄の続きにも文献が列挙されている。

☐ パテントファミリーに関する別紙を参照。

* 引用文献のカテゴリー

「A」 特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの
「E」 国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの
「L」 優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献 (理由を付す)
「O」 口頭による開示、使用、展示等に言及する文献
「P」 国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願

の日の後に公表された文献

「T」 国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と矛盾するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの
「X」 特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの
「Y」 特に関連のある文献であって、当該文献と他の1以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの
「&」 同一パテントファミリー文献

国際調査を完了した日

09. 11. 99

国際調査報告の発送日

16.11.99

国際調査機関の名称及びあて先

日本国特許庁 (ISA/J P)
郵便番号100-8915
東京都千代田区霞が関三丁目4番3号

特許庁審査官 (権限のある職員)

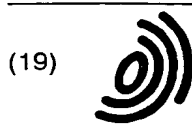
福田 聡



2K 9514

電話番号 03-3581-1101 内線 3255

C (続き) . 関連すると認められる文献		関連する 請求の範囲の番号
引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	
	5, 特にFig. 1, Table 1参照	
A	M. Onishi et al.: "Third-order dispersion compensating fibre s for non-zero dispersion shifted fibre links"; ELECTRONICS LETTERS, Vol. 36, No. 25 (5th December 1996), pp. 2344-2345	1-12
A	J P, 10-221562, A (ルーセント テクノロジーズ インコーポレイテッド), 21. 8月. 1998 (21. 08. 98) &EP, 859481, A&US, 5181673, A	1-12
A	J P, 8-313750, A (古河電気工業株式会社), 29. 1 1月. 1996 (29. 11. 96), 第11段落 &CA, 2170815, A&US, 5673354, A	1-12
A	J P, 8-136758, A (古河電気工業株式会社), 31. 5月. 1996 (31. 05. 96), 第5図 &CA, 2157828, A&US, 5568583, A	1-12
A	J P, 7-270636, A (エイ・ティ・アンド・ティ・コーポ レーション), 20. 10月. 1995 (20. 10. 95) &EP, 668520, A2&US, 5448674, A	1-12
A	J P, 6-222235, A (アメリカン テレフォン アンド テレグラフ カムパニー), 12. 8月. 1994 (12. 08. 94) &EP, 598554, A1	1-12
A	J P, 6-11620, A (コーニング インコーポレイテッ ド), 21. 1月. 1994 (21. 01. 94) &EP, 554714, A1&CA, 2084217, A&US, 5361319, A	1-12
P, X	J P, 10-319266, A (株式会社フジクラ), 4. 12月. 1998 (04. 12. 98), 全文, 特に, 第30段落, 表1, 第1図, 第2図参照 (ファミリー なし)	3
P, A	T. Tsuda et al.: "BROAD BAND DISPERSION SLOPE COMPENSATION O F DISPERSION SHIFTED FIBER USING NEGATIVE SLOPE FIBER"; ECOC '98 (20-24 September 1998), Vol. 1, pp. 233-234	1-12



(19)

Europäisches Patentamt

European Patent Office

Office européen des brevets



(11)

EP 1 130 428 A1

(12)

EUROPEAN PATENT APPLICATION

published in accordance with Art. 158(3) EPC

(43) Date of publication:
05.09.2001 Bulletin 2001/36

(21) Application number: 99937081.0

(22) Date of filing: 17.08.1999

(51) Int Cl.⁷: G02B 6/16, G02B 6/22

(86) International application number:
PCT/JP99/04413

(87) International publication number:
WO 00/17685 (30.03.2000 Gazette 2000/13)

(84) Designated Contracting States:
AT BE CH CY DE DK ES FI FR GB GR IE IT LI LU
MC NL PT SE

(30) Priority: 18.09.1998 JP 26545398

(71) Applicant: Sumitomo Electric Industries, Ltd.
Osaka-shi, Osaka 541-0041 (JP)

(72) Inventors:
• OKUNO, Toshiaki
Yokohama Works of Sumitomo
Sakae-ku Yokohama-shi Kanagawa 244-8588
(JP)

• ISHIKAWA, Shinji
Yokohama Works of Sumitomo
Sakae-ku Yokohama-shi Kanagawa 244-8588
(JP)
• KASHIWADA, Tomonori
Yokohama Works of Sumitomo
Sakae-ku Yokohama-shi Kanagawa 244-8588
(JP)

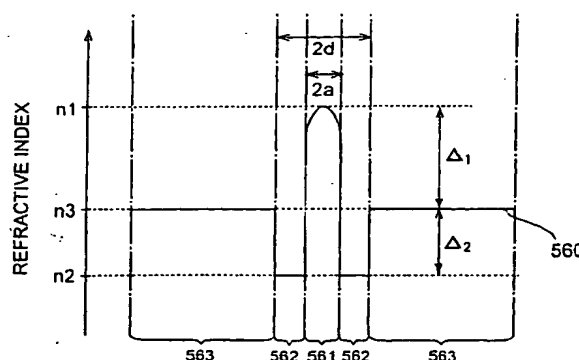
(74) Representative: HOFFMANN - EITLE
Patent- und Rechtsanwälte
Arabellastrasse 4
81925 München (DE)

(54) DISPERSION COMPENSATING FIBER

(57) The dispersion-compensating fiber according to the present invention is an optical fiber having a structure which, when constituting an optical transmission line together with a dispersion-shifted fiber, whose zero-dispersion wavelength is in a 1.5- μ m wavelength band, for guiding light signals in the 1.5- μ m wavelength band or 1.6- μ m wavelength band, is capable of improving transmission characteristics of the whole optical transmission line and allowing the dispersion to be compensated for efficiently and the size thereof to become smaller; and has a structure for improving the total dis-

persion slope of the optical transmission line while in a state fully compensating for the dispersion of the dispersion-shifted fiber. This dispersion-compensating fiber has a triple cladding structure having a first cladding, a second cladding, and a third cladding which are successively provided on the outer periphery of a core; and, in a state where the relative refractive index differences in the regions and outside diameters thereof are optimized so as to compensate for the dispersion-shifted fiber, realizes an optical transmission system having a favorable total dispersion slope.

Fig.11



Description

Technical Field

[0001] The present invention relates to a dispersion-compensating fiber which is employed to an optical transmission line including a dispersion-shifted fiber capable of long-haul, large-capacity optical communications utilizing wavelength division multiplexing (WDM) signals in a 1.5- μm wavelength band or 1.6- μm wavelength band and compensates for the dispersion of the dispersion-shifted fiber.

Background Art

[0002] In optical fiber transmission line networks used for high-speed, large-capacity communications over a long haul, the dispersion (chromatic dispersion) expressed by the sum of the material dispersion (dispersion caused by the wavelength dependence of refractive index inherent in the material of the optical fiber) and structural dispersion (dispersion caused by the wavelength dependence of the group velocity in the propagation mode) in the single-mode optical fiber employed as their transmission medium is a limiting factor for the transmission capacity. Namely, even when light outputted from a light source is assumed to have a single wavelength, it has an uniform spectrum width in the strict sense. When such an optical pulse propagates through a single-mode optical fiber having a predetermined chromatic dispersion characteristic, the pulse form may collapse since the propagation velocity varies among definite spectral components. This dispersion is expressed by a unit (ps/km/nm) of propagation delay time difference per unit spectrumwidth (nm) and unit optical fiber length (km). Also, it has been known that the material dispersion and structural dispersion cancel each other in the single-mode optical fiber, so that the dispersion becomes zero in the vicinity of 1.31 μm .

[0003] A dispersion-shifted fiber is an optical fiber whose zero-dispersion wavelength has been shifted from a 1.3- μm wavelength band to a 1.55- μm wavelength band since the transmission loss of optical fibers becomes the lowest in the 1.55- μm wavelength band; and a dispersion-compensating fiber is used as means for compensating for the dispersion of the dispersion-shifted fiber in general. As a technique for compensating for such a dispersion-shifted fiber, Japanese Patent Application Laid-Open No. HEI 10-39155 discloses a dispersion-compensating fiber and an optical transmission system using the same, for example.

[0004] Though being designed such that its dispersion becomes zero at a predetermined wavelength near the wavelength of 1.55 μm , the dispersion-shifted fiber has a positive dispersion slope, thus being hard to suppress the occurrence of chromatic dispersion over the whole wavelength band in use. As a consequence, in communications based on the wavelength division mul-

tiplexing (WDM) system, which multiplexes light signals having wavelengths different from each other and thereby enables the transmission capacity to further increase, and the like, various transmission characteristics may deviate among wavelengths. For this matter, the above-mentioned dispersion-compensating fiber disclosed in Japanese Patent Application Laid-Open No. HEI 10-39155 is configured so as to improve the dispersion slope of the optical transmission line including the dispersion-shifted fiber as well.

[0005] Here, the dispersion slope is given by the gradient of a graph which indicates chromatic dispersion, and is expressed by a unit (ps/nm²/km).

Disclosure of the Invention

[0006] The inventors have studied the conventional dispersion-compensating fiber and, as a result, have found problems as follows. Namely, the conventional dispersion-compensating fiber aimed at compensating for the dispersion of the dispersion-shifted fiber has a small chromatic dispersion, thereby necessitating a longer fiber length for compensating for the dispersion of the dispersion-shifted fiber. As a consequence, the efficiency of dispersion compensation has been low, and the apparatus and the like have inevitably increased their size. In addition, various characteristics of the conventional dispersion-compensating fiber applied to the dispersion-shifted fiber to be compensated for have not fully been optimized, and the dispersion slope in the optical transmission line to which the dispersion-shifted fiber is applied has not been improved sufficiently.

[0007] In order to overcome the foregoing problems, it is an object of the present invention to provide a dispersion-compensating fiber comprising a structure which compensates for the dispersion of a dispersion-shifted fiber, improves the total dispersion slope of an optical transmission system including the dispersion-shifted fiber over a wider wavelength band when applied thereto, and enables the dispersion to be compensated for efficiently and the apparatus to become smaller.

[0008] The dispersion-compensating fiber according to the present invention guides light signals of a 1.5- μm wavelength band or 1.6- μm wavelength band. It is an optical fiber for compensating for the dispersion of a dispersion-shifted fiber having a zero-dispersion wavelength in the 1.5- μm wavelength band, and comprises a core region extending along a predetermined reference axis and a cladding region provided on the outer periphery of the core region. The core region is constituted by a core having an outside diameter 2a. The cladding region is constituted by a first cladding provided on the outer periphery of the core and having an outside diameter 2b; a second cladding provided on the outer periphery of the first cladding and having an outside diameter 2c; and a third cladding provided on the outer periphery of the second cladding.

[0009] In this dispersion-compensating fiber, the re-

fractive index n_1 of the core, the refractive index n_2 of the first cladding, the refractive index n_3 of the second cladding, and the refractive index n_4 of the third cladding satisfy the condition of $n_1 > n_3 > n_4 > n_2$. Also, the respective relative refractive index differences Δ_1 and Δ_2 of the core and first cladding with respect to the third cladding satisfy at least the conditions of $1\% \leq \Delta_1 \leq 3\%$, and $\Delta_2 \leq -0.4\%$. Further, in this dispersion-compensating fiber, the outside diameter $2a$ of the core and the outside diameter $2c$ of the second cladding satisfy the condition of $2a/2c \leq 0.3$.

[0010] The dispersion-compensating fiber according to the present invention is characterized in that, when constituting an optical transmission system together with a dispersion-shifted fiber through which light signals of the 1.5- μm wavelength band or 1.6- μm wavelength band propagate, it has a length sufficient for the optical transmission system to yield a total dispersion slope of -0.024 ps/nm²/km or more but 0.024 ps/nm²/km or less with respect to respective light signals having a shortest wavelength λ_s and a longest wavelength λ_L in signal wavelengths within the wavelength band in use.

[0011] Specifically, the dispersion-compensating fiber has a length L_{DCF} which is set so as to satisfy the following condition with respect to light having a wavelength λ in signal wavelengths within the wavelength band in use:

$$|D_{DSF}(\lambda) \cdot L_{DSF} + D_{DCF}(\lambda) \cdot L_{DCF}| \leq 200 \text{ ps/nm}$$

where

$D_{DSF}(\lambda)$ is the dispersion of the dispersion-shifted fiber at the wavelength λ ;
 L_{DSF} is the length of the dispersion-shifted fiber;
 $D_{DCF}(\lambda)$ is the dispersion of the dispersion-compensating fiber at the wavelength λ ; and
 L_{DCF} is the length of the dispersion-compensating fiber.

[0012] More preferably, the length L_{DCF} of the dispersion-compensating fiber is set so as to satisfy the following condition with respect to all signal wavelengths λ_{all} of light within the wavelength band in use:

$$|D_{DSF}(\lambda_{all}) \cdot L_{DSF} + D_{DCF}(\lambda_{all}) \cdot L_{DCF}| \leq 200 \text{ ps/nm}$$

where

$D_{DSF}(\lambda_{all})$ is the dispersion of the dispersion-shifted fiber at all the wavelengths λ_{all} in use;
 L_{DSF} is the length of the dispersion-shifted fiber;
 $D_{DCF}(\lambda_{all})$ is the dispersion of the dispersion-compensating fiber at all the wavelengths λ_{all} in use; and
 L_{DCF} is the length of the dispersion-compensating

fiber.

[0013] Also, the relative refractive index difference Δ_1 of the core with respect to the third cladding preferably satisfies the condition of $1\% \leq \Delta_1 \leq 2\%$ if a lower transmission loss is required, and preferably satisfies the condition of $2\% \leq \Delta_1 \leq 3\%$ if a higher dispersion compensation efficiency is required due to a higher dispersion, and the range of Δ_1 can be set appropriately in view of various conditions such as use, equipment, and the like.

[0014] Thus, the dispersion-compensating fiber comprising a core region having a single core and a cladding region provided on the outer periphery of the core region and having three claddings (a triple cladding structure) can improve the total dispersion slope in the optical transmission system to which the dispersion-compensating fiber is applied, if the refractive index and outside diameter of each part thereof are set so as to satisfy such conditions as those mentioned above. Also, when the dispersion-compensating fiber is formed into a module, it is possible to select a chromatic dispersion having an absolute value which is large enough to enable the dispersion to be compensated for efficiently and the apparatus to become smaller.

[0015] In particular, while the dispersion-shifted fiber has a large dispersion slope notwithstanding the fact that its dispersion has a small absolute value, the dispersion compensation effected by a dispersion-compensating fiber having a double cladding structure cannot compensate for the dispersion slope and the dispersion at the same time, or necessitates a length on a par with the dispersion-shifted fiber to be compensated for. Further, there are practical problems such as greater bending loss. When the triple cladding structure as mentioned above is employed in the cladding region, various characteristics of the dispersion-compensating fiber can be optimized for overcoming such problems.

[0016] For example, in the dispersion-compensating fiber having a triple cladding structure, the length of the dispersion-compensating fiber necessary for dispersion compensation can be made shorter as the absolute value of the dispersion having a negative value is greater, whereby the dispersion compensation can be made more efficient. In particular, the fact that the relative refractive index difference Δ_1 of the core with respect to the third cladding is 1% or more but 3% or less is equivalent to the fact that, for example, the dispersion with respect to light having a wavelength of 1.55 μm is about -200 ps/nm/km or more but 0 ps/nm/km or less.

[0017] Also, the fact that the relative refractive index difference Δ_1 of the core with respect to the third cladding is 1% or more but 2% or less is equivalent to the fact that, for example, the dispersion with respect to light having a wavelength of 1.55 μm is about -100 ps/nm/km or more but 0 ps/nm/km or less. Similarly, the fact that the relative refractive index difference Δ_1 of the core with respect to the third cladding is 2% or more but 3%

or less is equivalent to the fact that, for example, the dispersion with respect to light having a wavelength of $1.55\ \mu\text{m}$ is about $-200\ \text{ps/nm/km}$ or more but $-100\ \text{ps/nm/km}$ or less.

[0018] Though the dispersion increases as the value of Δ_1 is enhanced, it is necessary that, for example, the amount of GeO_2 added to the core be increased in order to enhance the value of Δ_1 . On the other hand, an increase in the amount of addition of GeO_2 causes the transmission loss to increase. Therefore, it is preferred that, within the range of condition concerning Δ_1 , the condition of $1\% \leq \Delta_1 \leq 2\%$ and the condition of $2\% \leq \Delta_1 \leq 3\%$ be appropriately selected, in view of various conditions such as use, equipment, and the like, in the respective cases where a lower transmission loss and a higher dispersion compensation efficiency due to a higher dispersion are required.

[0019] Here, in the dispersion-compensating fiber according to the present invention, the relative refractive index difference Δ_3 of the second cladding with respect to the third cladding preferably satisfies the condition of $\Delta_3 \geq 0.1\%$. Also, the ratio of the outside diameter of the core to the outside diameter of the first cladding preferably satisfies the condition of $0.2 \leq 2a/2b \leq 0.5$. In addition, with respect to light having a wavelength of $1.55\ \mu\text{m}$, the dispersion-compensating fiber according to the present invention has a bending loss of $10\ \text{dB/m}$ or less at a diameter of $60\ \text{mm}$, a polarization mode dispersion of $0.5\ \text{ps} \cdot \text{km}^{-1/2}$ or less, and a transmission loss of $1\ \text{dB/km}$.

[0020] In practice, there is a case where such a dispersion-compensating fiber is employed as a small-size module wound like a coil. In this case, in particular, lowering the bending loss enables the apparatus to reduce its size and suppress its accompanying increase in transmission loss.

[0021] When an optical transmission system is constituted by a dispersion-shifted fiber through which WDM signals of the $1.55\text{-}\mu\text{m}$ wavelength band propagate and the dispersion-compensating fiber having a length sufficient for compensating for the dispersion of the dispersion-shifted fiber as mentioned in the foregoing, this optical transmission system yields a total dispersion slope of $-0.024\ \text{ps/nm}^2/\text{km}$ or more but $0.024\ \text{ps/nm}^2/\text{km}$ or less, preferably $-0.012\ \text{ps/nm}^2/\text{km}$ or more but $0.012\ \text{ps/nm}^2/\text{km}$ or less, with respect to respective light signals having the shortest wavelength λ_S and the longest wavelength λ_L in signal wavelengths within the wavelength band in use.

Brief Description of the Drawings

[0022]

Fig. 1A is a view showing a cross-sectional structure of a dispersion-compensating fiber according to the present invention, whereas Fig. 1B is a chart showing the refractive index profile of the disper-

sion-compensating fiber shown in Fig. 1A;

Fig. 2 is a view showing an example of an optical transmission system to which the dispersion-compensating fiber according to the present invention is applied;

Figs. 3A to 3C are graphs showing dependence characteristics of dispersion, dispersion slope, and bending loss at a diameter of $60\ \text{mm}$ upon core outside diameter in a first embodiment of the dispersion-compensating fiber according to the present invention, respectively;

Fig. 4 is a graph showing relationships between dispersion and dispersion slope in the dispersion-compensating fiber according to the first embodiment; Figs. 5A to 5C are graphs showing dependence characteristics of dispersion, dispersion slope, and bending loss at a diameter of $60\ \text{mm}$ upon core outside diameter in a second embodiment of the dispersion-compensating fiber according to the present invention, respectively;

Fig. 6 is a graph showing relationships between dispersion and dispersion slope in the dispersion-compensating fiber according to the second embodiment;

Fig. 7 is a graph showing relationships between dispersion and dispersion slope in a third embodiment of the dispersion-compensating fiber according to the present invention;

Figs. 8A to 8E are graphs showing dependence characteristics of total dispersion slope, dispersion, bending loss at a diameter of $20\ \text{mm}$, effective area (A_{eff}), and cutoff wavelength on core outside diameter in the dispersion-compensating fiber according to the third embodiment, respectively;

Fig. 9 is a graph showing relationships between dispersion and dispersion slope in a fourth embodiment of the dispersion-compensating fiber according to the present invention;

Fig. 10 is a graph for comparing the dispersion of the dispersion-compensating fiber according to the fourth embodiment and the dispersion of a dispersion-compensating fiber (comparative example) having a double cladding structure;

Fig. 11 is a chart showing the refractive index profile of the comparative example (dispersion-compensating fiber) having a double cladding structure;

Fig. 12 is a graph showing relationships between dispersion and core outside diameter when Δ_1 is changed in the dispersion-compensating fiber according to the fourth embodiment;

Fig. 13 is a graph showing relationships between dispersion and bending loss at a diameter of $40\ \text{mm}$ when Δ_1 is changed in the dispersion-compensating fiber according to the fourth embodiment;

Fig. 14 is a graph showing relationships between dispersion and core outside diameter when $2a/2b$ is changed in the dispersion-compensating fiber according to the fourth embodiment;

Fig. 15 is a graph showing relationships between dispersion and bending loss at a diameter of 40 mm when $2a/2c$ is changed in the dispersion-compensating fiber according to the fourth embodiment; Fig. 16 is a graph showing relationships between dispersion and core outside diameter when $2a/2c$ is changed in the dispersion-compensating fiber according to the fourth embodiment; Fig. 17 is a graph showing relationships between dispersion and bending loss at a diameter of 40 mm when $2a/2c$ is changed in the dispersion-compensating fiber according to the fourth embodiment; Fig. 18 is a (first) graph showing the wavelength dependence of the dispersion in an optical transmission system constituted by a dispersion-compensating fiber according to the present invention and a dispersion-shifted fiber; Fig. 19 is a (second) graph showing the wavelength dependence of the dispersion in an optical transmission system constituted by a dispersion-compensating fiber according to the present invention and a dispersion-shifted fiber; Fig. 20 is a view showing another configurational example of the optical transmission system to which the dispersion-compensating fiber according to the present invention is applied; and Fig. 21 is a view showing still another configurational example of the optical transmission system to which the dispersion-compensating fiber according to the present invention is applied.

Best Modes for Carrying Out the Invention

[0023] In the following, embodiments of the dispersion-compensating fiber according to the present invention will be explained with reference to Figs. 1A, 1B, 2, 3A to 3C, 4, 5A to 5C, 6, 7, 8A to 8E, and 9 to 21. Here, constituents identical to each other in the drawings will be referred to with numerals or letters identical to each other without repeating their overlapping explanations. Also, ratios of dimensions in the drawings do not always match those explained.

[0024] Fig. 1A is a view showing a cross-sectional structure of a dispersion-compensating fiber according to the present invention. This dispersion-compensating fiber 100 comprises a core region having a core 1 with an outside diameter $2a$; and a cladding region 5 of a triple cladding structure constituted by a first cladding 2 provided on the outer periphery of the core 1 and having an outside diameter $2b$, a second cladding 3 provided on the outer periphery of the first cladding 2 and having an outside diameter $2c$, and a third cladding 4 provided on the outer periphery of the second cladding 3. Fig. 1B is a chart showing a refractive index profile 550 of the dispersion-compensating fiber 100 shown in Fig. 1A in a diametric direction thereof (direction indicated by the line L in the chart). Here, the abscissa of the refractive index profile 550 shown in Fig. 1B corresponds to indi-

vidual parts along the line L in Fig. 1A on a cross section perpendicular to the center axis of the core 1. Hence, in the refractive index profile 550 in Fig. 1B, areas 10, 20, 30, and 40 indicate the refractive indices of individual parts on the line L of the core 1, first cladding 2, second cladding 3, and third cladding 4, respectively.

[0025] The dispersion-compensating fiber 100 is an optical waveguide mainly composed of SiO_2 (silica glass), and its characteristics are controlled by the outside diameter and refractive index of each region constituting the dispersion-compensating fiber 100, and the like. Here, Δ in the refractive index profile 550 shown in Fig. 1B indicates the relative refractive index difference of each region with reference to the refractive index of the third cladding 4, and is defined as follows:

$$\Delta_1 = (n_1 - n_4) / n_4$$

$$\Delta_2 = (n_2 - n_4) / n_4$$

$$\Delta_3 = (n_3 - n_4) / n_4$$

[0026] Here, n_1 , n_2 , n_3 , and n_4 are refractive indices of the core 1, first cladding 2, second cladding 3, and third cladding 4, respectively. Also, the relative refractive index difference Δ in this specification is expressed in terms of percent, and the refractive indices of individual regions in each defining expression may be arranged in any order. Consequently, a negative value of Δ indicates that the refractive index of its corresponding region is lower than the refractive index of the third cladding 4.

[0027] The dispersion-compensating fiber according to the present invention is configured such that the respective refractive indices of the above-mentioned individual regions 1 to 4 satisfy the following condition (1):

$$n_1 > n_3 > n_4 > n_2 \quad (1)$$

As a consequence, the respective relative refractive index differences of the individual regions with respect to the third cladding 4 satisfy the following condition (1a):

$$\Delta_1 > \Delta_3 > 0\% > \Delta_2 \quad (1a)$$

(Conditions (1) and (1a) are equivalent to each other.) Namely, they are configured such that Δ_1 and Δ_3 have positive values, Δ_2 has a negative value, and Δ_1 has the largest value.

[0028] An optical fiber with a triple cladding structure having such a refractive index profile is constructed, for example, as follows. The outermost third cladding 4 is formed from SiO_2 . In contrast, the core 1 and the second

cladding 3, which are mainly composed of SiO_2 , are doped with respective predetermined amounts of GeO_2 , such that their refractive indices are controlled so as to become higher than the refractive index of SiO_2 . On the other hand, the first cladding 2 mainly composed of SiO_2 is doped with a predetermined amount of F (fluorine), such that its refractive index is controlled so as to become lower than that of SiO_2 . Here, the configuration mentioned above is just an example of specific methods and configurations of refractive index control by means of such impurity doping, which is not restrictive. For example, the third cladding 4 may not be pure SiO_2 , but may be doped with a predetermined amount of a refractive index adjusting agent such as F.

[0029] Their respective relative refractive index differences further satisfy the following conditions (2) and (3):

$$1\% \leq \Delta_1 \leq 3\% \quad (2)$$

$$\Delta_2 \leq -0.4\% \quad (3)$$

Also, their respective outside diameters satisfy the following condition (4):

$$2a / 2c \leq 0.3 \quad (4)$$

When the refractive index and outside diameter of each region are set as mentioned above, a dispersion-compensating fiber capable of sufficiently improving a dispersion slope is obtained. Also, when the following conditions (5) and (6):

$$\Delta_3 \geq 0.1\% \quad (5)$$

$$0.2 \leq 2a / 2b \leq 0.5 \quad (6)$$

are satisfied, a further preferable dispersion-compensating fiber is obtained.

[0030] Here, the dispersion of the dispersion-compensating fiber is, for example, with respect to a wavelength of $1.55 \mu\text{m}$, about 0 ps/nm/km when $\Delta_1 = 1\%$, and about -200 ps/nm/km when $\Delta_1 = 3\%$. Consequently, if the value of Δ_1 is increased within the range of $1\% \leq \Delta_1 \leq 3\%$ of condition (2) concerning the relative refractive index difference Δ_1 of the core 1 with respect to the third cladding 4, then the absolute value of the dispersion having a negative value can be enhanced, whereby the dispersion compensation can be made more efficient. In order to increase the value of Δ_1 , on the other hand, it is necessary that, for example, the amount of GeO_2 added to the core 1 be increased so as to enhance the refractive index n_1 thereof. In this case, however, trans-

mission loss would increase due to the increase in Rayleigh scattering caused by GeO_2 being added, and the like. Since the upper limit value of Δ_1 is set to 3% , the dispersion-compensating fiber according to the present invention can suppress the transmission loss thereof to 1 dB/km or less, while securing sufficient dispersion compensation for the dispersion-shifted fiber to be compensated for.

[0031] Further, the range of condition (2) may be changed to the following two conditions (7) and (8):

$$1\% \leq \Delta_1 \leq 2\% \quad (7)$$

$$2\% \leq \Delta_1 \leq 3\% \quad (8)$$

Respective dispersion-compensating fibers satisfying these two conditions may be selected as necessary. Namely, Δ_1 may be selected so as to match condition (7) if a lower transmission loss is more important, whereas Δ_1 matching condition (8) may be selected if a higher dispersion is more important.

[0032] Also, while polarization mode dispersion (PMD) enhances along with increases in out-of-roundness which represents the deviation of the form of the core 1 from a perfect circle, the polarization mode dispersion caused by the deviation from the perfect circle also increases as the refractive index of the core 1 is greater, i.e., the value of Δ_1 is greater. Since the upper limit of Δ_1 is suppressed to 3% or less, the dispersion-compensating fiber according to the present invention can suppress its polarization mode dispersion to $0.5 \text{ ps} \cdot \text{km}^{-1/2}$ or less when the out-of-roundness is 0.5% or less, for example.

[0033] Fig. 2 is a view showing a configurational example of an optical transmission system to which the dispersion-compensating fiber according to the present invention is applied. In this optical transmission system, one end (entrance end) of a dispersion-shifted fiber 200 to be compensated for is optically connected to a transmitter 400 by way of an optical fiber transmission line 300 such as a single-mode optical fiber, whereas the other end (exit end) thereof is optically connected to one end (entrance end) of the dispersion-compensating fiber 100 according to the present invention. On the other hand, the other end (exit end) of the dispersion-compensating fiber 100 is optically connected to a receiver 500 by way of an optical fiber transmission line 300 such as a single-mode optical fiber.

[0034] Here, the total dispersion and total dispersion slope in the optical transmission system to which the dispersion-compensating fiber 100 is applied are defined as follows. Namely, the total dispersion of the optical transmission system constituted, as shown in Fig. 2, by the dispersion-shifted fiber 200 with a length of L_{DSF} having a dispersion D_{DSF} (17 ps/nm/km at a wavelength

of 1.55 μm) and a dispersion slope S_{DSF} (0.06 ps/nm²/km) and the dispersion-compensating fiber 100 with a length of L_{DCF} having a dispersion D_{DCF} and a dispersion slope S_{DCF} is given by:

$$D_{\text{DSF}} \cdot L_{\text{DSF}} + D_{\text{DCF}} \cdot L_{\text{DCF}}$$

Also, the total dispersion slope in the optical transmission system is given by:

$$(S_{\text{DSF}} \cdot L_{\text{DSF}} + S_{\text{DCF}} \cdot L_{\text{DCF}}) / L_{\text{DSF}}$$

Here, since the length of the dispersion-compensating fiber 100 is much shorter than that of the transmission line portion constituted by the dispersion-compensating fiber 100 and the dispersion-shifted fiber 200, its contribution to the total dispersion and total dispersion slope in the optical transmission system is negligible.

[0035] The dispersion-compensating fiber according to the present invention has such characteristics that, in the optical transmission system to which it is applied together with the dispersion-shifted fiber, the value of total dispersion slope becomes -0.024 ps/nm²/km or more but 0.024 ps/nm²/km or less under the condition where its dispersion is sufficiently compensated for with respect to light having a wavelength of 1.55 μm , i.e., under the condition where the total dispersion becomes zero.

[0036] The basis for this numerical range of total dispersion slope is as follows. Namely, in the case of WDM transmission with a signal bandwidth of 30 nm and a transmission length of 300 km, a difference of 216 ps/nm occurs between both ends of the signal band (the shortest and longest wavelengths in the signal band) when the total dispersion slope is 0.024 ps/nm²/km. A permissible dispersion width of transmission limits in such optical transmission is described, for example, in "Optical Fiber Communication (OFC'96) Technical digest Postdeadline paper PD 19 (1996)"; and, according to its description, the limit of permissible dispersion width is about 200 ps/nm when the bandwidth is 32.4 nm in the optical transmission over 150 km of a single-mode optical fiber. In view of this, for carrying out wideband, high-speed WDM transmission in an optical fiber transmission line having a length of 150 km or more, it is necessary that the total dispersion slope of the optical transmission line be -0.024 ps/nm²/km or more but 0.024 ps/nm²/km or less.

[0037] Further, when a dispersion-compensating fiber which is adapted to yield a total dispersion slope value of -0.012 ps/nm²/km or more but 0.012 ps/nm²/km or less is employed, an optical transmission system capable of higher-speed optical transmission can be realized. Namely, the total dispersion slope value is needed to be made further smaller in high-speed optical transmission at 20 Gbits/sec or at 30 Gbits/sec. According to the description in "Optical Fiber Communication

(OFC'96) Technical digest Postdeadline paper PD 19 (1996)," optical transmission over a distance up to about 500 to 600 km is possible when the total dispersion slope is -0.012 ps/nm²/km or more but 0.012 ps/nm²/km or less.

[0038] Here, in order to constitute the optical transmission system as mentioned above, the length L_{DCF} of the dispersion-compensating fiber is set so as to satisfy the following condition with respect to light having a wavelength λm in signal wavelengths within the wavelength band in use:

$$|D_{\text{DSF}}(\lambda\text{m}) \cdot L_{\text{DSF}} + D_{\text{DCF}}(\lambda\text{m}) \cdot L_{\text{DCF}}| \leq 200 \text{ ps / nm}$$

where

$D_{\text{DSF}}(\lambda\text{m})$ is the dispersion of the dispersion-shifted fiber at the wavelength λm ;

L_{DSF} is the length of the dispersion-shifted fiber;

$D_{\text{DCF}}(\lambda\text{m})$ is the dispersion of the dispersion-compensating fiber at the wavelength λm ; and

L_{DCF} is the length of the dispersion-compensating fiber.

[0039] More preferably, the length L_{DCF} of the dispersion-compensating fiber is set so as to satisfy, with respect to all signal wavelengths λ_{all} of light within the wavelength band in use, the following condition:

$$|D_{\text{DSF}}(\lambda_{\text{all}}) \cdot L_{\text{DSF}} + D_{\text{DCF}}(\lambda_{\text{all}}) \cdot L_{\text{DCF}}| \leq 200 \text{ ps / nm}$$

where

$D_{\text{DSF}}(\lambda_{\text{all}})$ is the dispersion of the dispersion-shifted fiber at all the wavelengths λ_{all} in use;

L_{DSF} is the length of the dispersion-shifted fiber;

$D_{\text{DCF}}(\lambda_{\text{all}})$ is the dispersion of the dispersion-compensating fiber at all the wavelengths λ_{all} in use; and

L_{DCF} is the length of the dispersion-compensating fiber.

[0040] The dispersion compensation ratio, which is employed as an index for evaluating the dispersion-compensating fiber together with the above-mentioned total dispersion slope value, will now be explained. In this specification, the dispersion compensation ratio of the dispersion-compensating fiber for compensating for the dispersion-shifted fiber is defined as the value obtained when the ratio of the dispersion slope of the dispersion-compensating fiber to the dispersion slope of the dispersion-shifted fiber at a wavelength of 1.55 μm is divided by the ratio of the dispersion of the dispersion-compensating fiber to the dispersion of the dispersion-shifted fiber at a wavelength of 1.55 μm , and represents, when an optical transmission system is constituted by the dispersion-shifted fiber and the dispersion-compensating fiber,

sating fiber, the correlation between the total dispersion and total dispersion slope in the optical transmission system. Namely, letting D_{DSF} be the dispersion of the dispersion-shifted fiber, S_{DSF} be the dispersion slope thereof, D_{DCF} be the dispersion of the dispersion-compensating fiber, and S_{DCF} be the dispersion slope thereof, the dispersion compensation ratio DSCR is given by:

$$DSCR = (S_{DCF}/D_{DCF}) / (S_{DSF}/D_{DSF})$$

[0041] For example, in an optical transmission system having a dispersion compensation ratio of 100%, the ratio in length between the dispersion-shifted fiber and the dispersion-compensating fiber is set such that the total dispersion becomes zero, whereby the total dispersion slope value becomes 0 ps/nm²/km simultaneously, thus completely compensating for the total dispersion and total dispersion slope at the same time. In an optical transmission system having a dispersion compensation ratio of 50%, for example, which is not greater than 100%, on the other hand, the total dispersion slope can be compensated for by only 50% even if the ratio in length between the dispersion-shifted fiber and the dispersion-compensating fiber is set such that the total dispersion becomes zero. In this case, if the dispersion slope of the dispersion-shifted fiber is 0.07 ps/nm²/km, then the total dispersion slope after the compensation becomes 0.035 ps/nm²/km. In an optical transmission system having a dispersion compensation ratio of 150%, for example, which is not lower than 100%, in contrast, the total dispersion slope can be compensated for in excess by 50% even if the ratio in length between the dispersion-shifted fiber and the dispersion-compensating fiber is set such that its total dispersion becomes zero. In this case, if the dispersion slope of the dispersion-shifted fiber is 0.07 ps/nm²/km, then the total dispersion slope after the compensation becomes -0.035 ps/nm²/km.

[0042] With regard to the optical transmission system to which the dispersion-compensating fiber according to the present invention is applied, the condition for the total dispersion slope to become -0.024 ps/nm²/km or more but 0.024 ps/nm²/km or less corresponds to, for example, the state where the dispersion compensation ratio is about 66% or more but 134% or less in the case where the dispersion-compensating fiber is connected to the dispersion-shifted fiber whose dispersion slope is 0.07 ps/nm²/km. Similarly, the condition for the total dispersion slope of -0.012 ps/nm²/km or more but 0.012 ps/nm²/km or less corresponds to the state where the dispersion compensation ratio is about 83% or more but 117% or less.

[0043] The configuration of such an optical transmission system is not limited to that mentioned above. For example, though the dispersion-compensating fiber 100 is arranged downstream from the dispersion-shifted fiber 200 in Fig. 2, it may be located upstream from the dispersion-shifted fiber 200. Also, the optical transmis-

sion line of the optical transmission system shown in Fig. 2 may be an optical transmission line network capable of bidirectional communications. As the optical fiber transmission line 300, not only a single-mode optical fiber but also other modes of optical fibers may be employed as required. If necessary, repeaters and the like can be installed on the transmission line.

[0044] Specific embodiments of the dispersion-compensating fiber according to the present invention and their characteristics will now be explained. Here, all of various characteristics such as dispersion and dispersion slope in each of the embodiments set forth in the following are based on results of calculations employing a finite-element method.

(First Embodiment)

[0045] The cross-sectional structure of the dispersion-compensating fiber according to the first embodiment and its refractive index profile are similar to the cross-sectional structure shown in Fig. 1A and the refractive index profile shown in Fig. 1B, respectively. Prepared as the dispersion-compensating fiber according to the first embodiment were four kinds of samples in which the relative refractive index difference Δ_1 of the core 1 with respect to the third cladding 4, the relative refractive index difference Δ_2 of the first cladding 2 with respect to the third cladding 4, the relative refractive index difference Δ_3 of the second cladding 3 with respect to the third cladding 4, and the ratio 2a/2b of the outside diameter 2a of the core 1 to the outside diameter 2b of the first cladding 2 were fixed at 1.1%, -0.7%, 0.08%, and 0.42, respectively, whereas the respective values of the ratio 2a/2c of the outside diameter 2a of the core 1 to the outside diameter 2c of the second cladding 3 were (a) 0.10, (b) 0.13, (c) 0.15, and (d) 0.20. Here, the relative refractive index differences Δ_1 , Δ_2 , and Δ_3 , and 2a/2b mentioned above satisfy the individual conditions (1), (2), (3), (6), and (7) mentioned above, whereas 2a/2b mentioned above satisfies condition (4).

[0046] Figs. 3A to 3C are graphs showing the dispersion (Da to Dd), dispersion slope (Sa to Sd), and bending loss at a diameter of 60 mm (Ba to Bd) for each value of 2a/2c with respect to light having a wavelength of 1.55 μ m. Here, suffixes a to d correspond to the respective values (a) to (d) of 2a/2c. Each abscissa indicates the outside diameter 2a of the core 1, and the bending loss is a small value of about 10⁻² dB/m or less within the calculated range. Also, the dispersion and the dispersion slope are within the range of about -50 to 0 ps/nm²/km and the range of about -2.0 to 0 ps/nm²/km, respectively.

[0047] Relationships between the dispersion and dispersion slope are indicated by Aa to Ad in Fig. 4. In the graph of Fig. 4, dotted lines P0 to P4 indicate dispersion compensation ratios in the case where connection to a dispersion-shifted fiber having a dispersion of 2 ps/nm²/km and a dispersion slope of 0.07 ps/nm²/km at a wave-

length of 1.55 μm is assumed. Dotted line P0 indicates the case where the dispersion compensation ratio is 100%, and corresponds to the state where the dispersion is completely compensated for and the total dispersion slope is 0 ps/nm²/km. Dotted lines P1 and P2 indicate the cases where the dispersion compensation ratio is about 66% and 134%, respectively, and similarly correspond to the states where the total dispersion slope is 0.024 and -0.024 ps/nm²/km, respectively. Dotted lines P3 and P4 indicate the cases where the dispersion compensation ratio is about 83% and 117%, respectively, and correspond to the states where the total dispersion slope is 0.012 and -0.012 ps/nm²/km, respectively. From these relationships, it can be seen that the case (a) where the value of $2a/2c$ is 0.10 is the most preferable as the dispersion-compensating fiber of this embodiment. Namely, in the case where the relative refractive index difference Δ_3 of the second cladding 3 with respect to the third cladding 4 is 0.08%, a dispersion-compensating fiber which can effectively restrain bending loss from increasing is obtained when the outside diameter $2c$ of the second cladding 3 is enhanced.

(Second Embodiment)

[0048] As with the first embodiment, the second embodiment has the structure and refractive index profile shown in Figs. 1A and 1B. Prepared as the dispersion-compensating fiber according to the second embodiment were three kinds of samples in which the relative refractive index difference Δ_1 of the core 1 with respect to the third cladding 4, the relative refractive index difference Δ_2 of the first cladding 2 with respect to the third cladding 4, the relative refractive index difference Δ_3 of the second cladding 3 with respect to the third cladding 4, and the ratio $2b/2c$ of the outside diameter $2b$ of the first cladding 2 to the outside diameter $2c$ of the second cladding 3 were fixed at 2.5%, -0.7%, 0.08%, and 0.44, respectively, whereas the respective values of the ratio $2a/2b$ of the outside diameter $2a$ of the core 1 to the outside diameter $2b$ of the first cladding 2 were (a) 0.25, (b) 0.34, and (c) 0.41. Here, the relative refractive index differences Δ_1 , Δ_2 , and Δ_3 , and $2b/2c$ mentioned above satisfy the individual conditions (1), (2), (3), and (8) mentioned above, whereas each of the three kinds of $2a/2b$ mentioned above satisfies conditions (4) and (6).

[0049] Figs. 5A to 5C are graphs showing the dispersion (Da to Dc), dispersion slope (Sa to Sc), and bending loss at a diameter of 60 mm (Ba to Bc) for each value of $2a/2b$ with respect to light having a wavelength of 1.55 μm . Here, suffixes a to c correspond to the respective values (a) to (c) of $2b/2c$. Each abscissa indicates the outside diameter $2a$ of the core 1, and the bending loss is a small value of about 10^{-4} dB/m or less within the calculated range. Also, the dispersion and the dispersion slope are within the range of about -200 to -50 ps/nm/km and the range of about -2.0 to 0 ps/nm²/km, respectively.

[0050] Relationships between the dispersion and dispersion slope are indicated by Aa to Ac in Fig. 6. In the graph of Fig. 6, dotted lines P0 to P4 indicate dispersion compensation ratios in the case where connection to a dispersion-shifted fiber having a dispersion of 5 ps/nm/km and a dispersion slope of 0.07 ps/nm²/km at a wavelength of 1.55 μm is assumed. The dispersion compensation ratio and total dispersion slope corresponding to each dotted line are similar to those in the graph of Fig. 4. From these relationships, it can be seen that the case (a) where the value of $2a/2c$ is 0.25 is the most preferable as the dispersion-compensating fiber of this embodiment.

[0051] Here, although the above-mentioned first embodiment is an example in which the relative refractive index difference Δ_1 of the core 1 with respect to the third cladding 4 is 1.1% and thus satisfies condition (7): $1\% \leq \Delta_1 \leq 2\%$, the relative refractive index difference Δ_1 (2.5%) in the second embodiment satisfies condition (8): $2\% \leq \Delta_1 \leq 3\%$. Here, while the dispersion is within the range of -50 to 0 ps/nm/km in the first embodiment, it is within the range of -200 to -50 ps/nm/km in the second embodiment, whereby the absolute value of dispersion is enhanced as the relative refractive index difference Δ_1 is made greater. While the same holds true for other parameters as well, various characteristics of the dispersion-compensating fiber largely depend on these parameters concerning the refractive index and outside diameter as can be seen when the first and second embodiments are compared with each other, whereby it is important that the individual parameters be optimized so as to yield characteristics corresponding to the use of the dispersion-compensating fiber or necessary conditions.

(Third Embodiment)

[0052] As with the first and second embodiments, the third embodiment has the structure and refractive index profile shown in Figs. 1A and 1B. Prepared as the dispersion-compensating fiber according to the third embodiment were a plurality of samples in which the relative refractive index difference Δ_1 of the core 1 with respect to the third cladding 4, the relative refractive index difference Δ_3 of the second cladding 3 with respect to the third cladding 4, the ratio $2a/2b$ of the outside diameter $2a$ of the core 1 to the outside diameter $2b$ of the first cladding, the ratio $2a/2c$ of the outside diameter $2a$ of the core 1 to the outside diameter $2c$ of the second cladding 3 were fixed at 1.4%, 0.4%, 0.4, and 0.27, respectively, whereas the relative refractive index difference Δ_2 of the first cladding with respect to the third cladding 4 was within the range of -0.8% to -0.3%. Here, the relative refractive index differences Δ_1 and Δ_3 , $2a/2b$, and $2a/2c$ mentioned above satisfy the individual conditions (1), (2), (4), (5), (6), and (7) mentioned above, whereas the above-mentioned relative refractive index difference Δ_2 satisfies condition (3) except for a sample

in which it is -0.3%.

[0053] Relationships between the dispersion and dispersion slope of the dispersion-compensating fiber according to the third embodiment are shown in the graph of Fig. 7. In this graph, dotted lines P0 to P4 indicate dispersion compensation ratios in the case where connection to a dispersion-shifted fiber having a dispersion of 5 ps/nm/km and a dispersion slope of 0.07 ps/nm²/km at a wavelength of 1.55 μ m is assumed. The values of dispersion compensation ratio and total dispersion slope corresponding to each dotted line are similar to those in the graph of Fig. 4. As can also be seen from this graph, the absolute value of the dispersion slope with respect to a given dispersion value becomes greater as the absolute value of Δ_2 increases (-0.8%, -0.7%, ..., -0.3%) and, if Δ_2 is set in the vicinity of -0.7%, approaches dotted line P0 which indicates a dispersion compensation ratio of 100%, thereby making it possible to compensate for the dispersion slope in a wide range of dispersion value at the same time as well.

[0054] Figs. 8A to 8E are graphs showing the total dispersion slope, dispersion, bending loss at a diameter of 20 mm, effective area A_{eff} , and cutoff wavelength with respect to light having a wavelength of 1.55 μ m when $\Delta_2 = -0.7\%$ as a preferable value, respectively. In each graph, the abscissa indicates the outside diameter 2a of the core 1. Here, while the total dispersion slope is a value obtained under the condition where the dispersion at a wavelength of 1.55 μ m is completely compensated for with respect to the dispersion-shifted fiber having the above-mentioned dispersion and dispersion slope, the absolute value of total dispersion slope is suppressed to 0.012 ps/nm²/km or less over a very wide range where the outside diameter 2a of the core 1 is about 4.84 to 5.13 μ m. Here, the absolute value of total dispersion slope was 0.024 ps/nm²/km or less over the whole calculated range.

[0055] There are cases where the dispersion-compensating fiber is used as a module in a state accommodated within a predetermined container while being wound like a coil. Therefore, it is necessary to take account of the bending loss of the dispersion-compensating fiber. Here, letting the upper limit of bending loss at a diameter of 20 mm be 5 dB/m, the lower limit of the outside diameter 2a of the core is 4.86 μ m as can also be seen from the graph of Fig. 8C. Further, in order to decrease the necessary fiber length by enhancing the dispersion compensation efficiency of the dispersion-compensating fiber, it is important that the absolute value of the dispersion having a negative value be made greater. In the third embodiment, a dispersion as large as about -60 ps/nm/km can be achieved as indicated in the graph of Fig. 8B. Consequently, the necessary fiber length of the dispersion-compensating fiber can become about 1/10 of the dispersion-shifted fiber transmission line.

[0056] As for the bending loss, though the value of bending loss at a diameter of 20 mm is indicated in the

explanation of the third embodiment, the bending loss at a diameter of 60 mm becomes a value smaller than that at the diameter of 20 mm.

[0057] In the case of the dispersion-compensating fiber according to the third embodiment, the effective area A_{eff} is about 17 μ m (see Fig. 8D), thus being on a par with that of the current dispersion-compensating fiber. Also, the cutoff wavelength of the second-order mode at a fiber length of 2 m is about 1.8 μ m (see Fig. 8E). Here, though the single mode is not guaranteed at the fiber length of 2 m in this embodiment, the single mode is guaranteed in actual uses since there exists a sufficient fiber length due to the distance dependence of cutoff wavelength.

(Fourth Embodiment)

[0058] In an optical transmission line including a dispersion-shifted fiber of a 1.55- μ m wavelength band, there are cases where it is necessary to carry out WDM transmission of a 1.58- μ m wavelength band in order to suppress nonlinear effects, and the dispersion-compensating fiber according to the present invention is also applicable to such cases.

[0059] Fig. 9 is a graph showing an example of the wavelength dependence of the dispersion and dispersion slope in the fourth embodiment of the dispersion-compensating fiber according to the present invention. Here, C1 indicates the curve of dispersion slope, whereas C2 indicates the curve of dispersion. If the minimum value of dispersion is appropriately selected, a large dispersion slope can be obtained, for example, in a region with a large absolute value of dispersion on the order of -150 to -300 ps/nm/km. Though such a region is susceptible to bending loss, in the case of a dispersion-shifted fiber having a dispersion on the order of 1.5 to 3.0 ps/nm/km with respect to light in the 1.58- μ m wavelength band, the dispersion and dispersion slope of the dispersion-shifted fiber having a length of about 80 km can be compensated for by a length of less than 1 km. Therefore, while the minimum diameter of the module (in which the dispersion-compensating fiber is wound like a coil) is set greater and the refractive index of the second cladding 3 is made greater, so as to yield a structure resistant to bending, the distance dependence of the cutoff wavelength λ_c is employed, whereby a practically usable dispersion-compensating fiber is obtained.

[0060] Fig. 10 is a graph showing an example of wavelength dependence of the dispersion in a dispersion-compensating fiber having a triple cladding structure (indicated by C100 in the graph) and the dispersion in a dispersion-compensating fiber having a double cladding structure (indicated by C200 in the graph) which is a comparative example. While the dispersion in the dispersion-compensating fiber of double cladding structure has a minimum value near the base cutoff wavelength (wavelength to become a maximum), no

base cutoff wavelength is seen in the dispersion-compensating fiber of triple cladding structure, whereby a large negative dispersion value can be realized.

[0061] Here, Fig. 11 shows the refractive index profile 560 of the dispersion-compensating fiber of double cladding structure, which is a comparative example, and the dispersion-compensating fiber of the comparative example corresponds to a structure in which the second cladding 3 (corresponding to the area 30) is excluded from the triple cladding structure shown in Fig. 1A (i.e., $2d = 2b$). Consequently, in the refractive index profile 560 of Fig. 11, areas 561, 562, and 563 indicate the refractive indices of the core portion, first cladding portion, and second cladding portion corresponding to the individual parts on the line L of the core 1, first cladding 2, and third cladding 4 shown in Fig. 1A, respectively. Hence, the dispersion-compensating fiber as the comparative example comprises the core portion having a refractive index n_1 and an outside diameter $2a$; the first cladding portion provided on the outer periphery of the core portion and having a refractive index n_2 ($< n_1$) and an outside diameter $2d$; and the second cladding portion provided on the outer periphery of the first cladding portion and having a refractive index n_3 ($> n_2$, and $< n_1$). Also, Δ_1 shown in Fig. 11 is the relative refractive index difference of the core portion with respect to the above-mentioned second cladding portion, whereas Δ_2 is the relative refractive index difference of the core portion with respect to the above-mentioned second cladding portion.

[0062] Curves Ca to Ce in Fig. 12 indicate relationships between the dispersion and the core outside diameter $2a$ in the case where the value of Δ_1 is changed, whereas curves Ba to Be in Fig. 13 indicate relationships between the dispersion and the bending loss at a diameter of 40 mm in the case where the value of Δ_1 is changed. Suffixes a to e in these graphs correspond to respective cases where Δ_1 is set to (a) 1.83, (b) 2.13, (c) 2.42, (d) 2.71, and (e) 2.99, whereas Δ_2 , Δ_3 , $2a/2c$, and $2a/2b$ are fixed at -0.67%, 0.147%, 0.125, 0.25, and 0.5 in each case, respectively.

[0063] When the relative refractive index difference Δ_1 is set low, the negative peak value of dispersion can be made greater, whereby a large dispersion slope can be obtained in a larger area of the core outside diameter $2a$ from the peak. From the viewpoint of bending loss, on the other hand, it is desirable that Δ_1 be higher with respect to the same dispersion value. Balancing these opposite effects, an optimal value of Δ_1 can be derived.

[0064] Curves Ca to Ce in Fig. 14 indicate relationships between the dispersion and the outer core diameter $2a$ in the case where the value of $2a/2b$ is changed, whereas curves Ba to Be in Fig. 15 indicate relationships between the dispersion and the bending loss at a diameter of 40 mm in the case where the value of $2a/2b$ is changed. Suffixes a to e in these graphs correspond to respective cases where $2a/2b$ is set to (a) 0.231, (b) 0.242, (c) 0.250, (d) 0.263, and (e) 0.273, whereas Δ_1 ,

Δ_2 , Δ_3 , and $2a/2c$ are fixed at 2.51%, -0.67%, 0.147%, and 0.125 in each case, respectively.

[0065] In particular, while the negative peak value of dispersion can be increased when $2a/2b$ is made smaller, its effect is opposite to the bending loss as in the case where the refractive index Δ_1 is changed.

[0066] Further, curves Ca to Cf in Fig. 16 indicate relationships between the dispersion and the outer core diameter $2a$ in the case where the value of $2a/2c$ is changed, whereas curves Ba to Bf in Fig. 17 indicate relationships between the dispersion and the bending loss at a diameter of 40 mm in the case where the value of $2a/2c$ is changed. Suffixes a to f in these graphs correspond to respective cases where $2a/2c$ is set to (a) 0.101, (b) 0.110, (c) 0.117, (d) 0.125, (e) 0.133, and (f) 0.156, whereas Δ_1 , Δ_2 , Δ_3 , and $2a/2b$ are fixed at 2.51%, -0.67%, 0.147%, and 0.25 in each case, respectively.

[0067] In both of respective cases where $2a/2c$ is enhanced and reduced, the negative peak value of dispersion tends to increase. In view of the dependence of bending loss on the dispersion value, on the other hand, the effect of improving the bending loss is greater when $2a/2c$ is smaller, whereby it is desirable that the value of $2a/2c$ be smaller. Here, it is necessary that an appropriate value be selected such that the cutoff wavelength λ_c does not become too long.

[0068] Figs. 18 and 19 show graphs indicating the wavelength dependence characteristics of optical transmission systems each comprising such a dispersion-compensating fiber and a dispersion-shifted fiber. As individual parameters of the dispersion-compensating fiber, Δ_1 , Δ_2 , Δ_3 , $2a/2c$, $2a/2b$, and $2b/2c$ are set to 2.51%, -0.67%, 0.147%, 0.11, 0.25, and 0.44, respectively. Also, a dispersion-shifted fiber having a zero-dispersion wavelength of 1.536 μm and a dispersion slope of 0.066 ps/nm²/km is assumed to be the object to be compensated for in the optical transmission system having the wavelength dependence of dispersion shown in Fig. 18, whereas a dispersion-shifted fiber having a zero-dispersion wavelength of 1.552 μm and a dispersion slope of 0.075 ps/nm²/km is assumed to be the object to be compensated for in the optical transmission system having the wavelength dependence of dispersion shown in Fig. 19. In any case, a low dispersion value is realized within the wavelength range of 1.57 to 1.60 μm .

[0069] Figs. 20 and 21 show configurational examples of the optical transmission system for carrying out WDM transmission of a 1.58- μm wavelength band, to which a dispersion-compensating fiber and a dispersion-shifted fiber such as those mentioned above are applied. In the optical transmission system of Fig. 20, two repeating amplifiers 600 (EDFA: Erbium-doped fiber amplifier for the 1.58- μm wavelength band) are installed in a transmission line between a transmitter 400 and a receiver 500, whereas a dispersion-shifted fiber 200 having a length of 94 km and a dispersion-compensating fiber 100 having a length of 1 km for compensating for the dispersion and dispersion slope of the disper-

sion-shifted fiber 200 are installed between the repeating amplifiers 600.

[0070] In the optical transmission system of Fig. 21, on the other hand, a preamplifier 700 and a back-end amplifier 800 are installed in a transmission line between a transmitter 400 and a receiver 500, whereas a plurality of (four in the drawing) repeating amplifiers 600 are installed between the preamplifier 700 and the back-end amplifier 800. A dispersion-shifted fiber 200 having a length of 80 km is installed between each pair of the repeating amplifiers 600. On the other hand, a dispersion-compensating fiber 100 having a length of 4.8 km is installed between the back-end amplifier 800 and the receiver 500, so as to compensate for the dispersion and dispersion slope in the optical transmission system. In these optical transmission systems, a 1.56- to 1.61- μm eight-wave multiplexing transmitter, for example, is employed as the transmitter 400.

[0071] The length of each fiber and the like in the explanation of the optical transmission systems shown in Figs. 20 and 21 are just examples thereof, and are set appropriately according to characteristics of the individual fibers so as to realize dispersion compensation and the like.

Industrial Applicability

[0072] In the dispersion-compensating fiber according to the present invention, as explained in the foregoing, a triple cladding structure is employed in the dispersion-compensating fiber for carrying out the dispersion compensation for the dispersion-shifted fiber, and the refractive index and outer diameter of each part thereof are optimized, whereby the dispersion slope can also be sufficiently compensated for at the same time when dispersion compensation is carried out.

[0073] Also, since the relative refractive index difference Δ_1 of the core portion and the like are set such that the absolute value of dispersion is sufficiently enhanced, the length of the dispersion-compensating fiber necessary for dispersion compensation (ratio of its length to that of the dispersion-shifted fiber to be compensated for) can be decreased, and the bending loss can be made sufficiently small. As a result, when the dispersion-compensating fiber is wound like a coil so as to construct a module, the latter can be made smaller, and efficient compensation of dispersion and dispersion slope can be realized.

Claims

1. A dispersion-compensating fiber for compensating for a dispersion of a predetermined length of a dispersion-shifted fiber having a zero-dispersion wavelength in a 1.5- μm wavelength band, comprising:

a core region extending along a predetermined reference axis and having a core with an outside diameter 2a; and

a cladding region which is a region provided on the outer periphery of said core region, said cladding region having a first cladding provided on the outer periphery of said core and having an outside diameter 2b, a second cladding provided on the outer periphery of said first cladding and having an outside diameter 2c, and a third cladding provided on the outer periphery of said second cladding,

wherein a refractive index n_1 of said core, a refractive index n_2 of said first cladding, a refractive index n_3 of said second cladding, and a refractive index n_4 of said third cladding satisfy

$$n_1 > n_3 > n_4 > n_2;$$

wherein respective relative refractive index differences Δ_1 and Δ_2 of said core and said first cladding with respect to said third cladding satisfy

$$1\% \leq \Delta_1 \leq 3\%,$$

and

$$\Delta_2 \leq -0.4\%;$$

wherein the ratio of the outside diameter of said core with respect to the outside diameter of said second cladding satisfies

$$2a / 2c \leq 0.3;$$

and

wherein, when said predetermined length of dispersion-shifted fiber and said dispersion-compensating fiber having a length sufficient to compensate for the dispersion of said dispersion-shifted fiber are optically connected to each other to constitute an optical transmission system, said dispersion-compensating fiber causes a total dispersion slope in said optical transmission system to have an absolute value of 0.024 ps/nm²/km or less with respect to light having a shortest wavelength and light having a longest wavelength in signal wavelengths within a wavelength band in use.

2. A dispersion-compensating fiber according to claim 1, wherein said dispersion-compensating fiber causes the total dispersion slope in said optical

transmission system to have an absolute value of 0.012 ps/nm²/km or less with respect to light having the shortest wavelength and light having the longest wavelength in signal wavelengths within the wavelength band in use.

3. A dispersion-compensating fiber for compensating for a dispersion of a predetermined length of a dispersion-shifted fiber having a zero-dispersion wavelength in a 1.5-μm wavelength band, comprising:

a core region extending along a predetermined reference axis and having a core with an outside diameter 2a; and
a cladding region which is a region provided on the outer periphery of said core region, said cladding region having a first cladding provided on the outer periphery of said core and having an outside diameter 2b, a second cladding provided on the outer periphery of said first cladding and having an outside diameter 2c, and a third cladding provided on the outer periphery of said second cladding,
wherein a refractive index n_1 of said core, a refractive index n_2 of said first cladding, a refractive index n_3 of said second cladding, and a refractive index n_4 of said third cladding satisfy

$$n_1 > n_3 > n_4 > n_2;$$

wherein respective relative refractive index differences Δ_1 and Δ_2 of said core and said first cladding with respect to said third cladding satisfy

$$1\% \leq \Delta_1 \leq 3\%,$$

and

$$\Delta_2 \leq -0.4\%;$$

wherein the ratio of the outside diameter of said core to the outside diameter of said second cladding satisfies

$$2a / 2c \leq 0.3;$$

and

wherein said dispersion-compensating fiber has a length sufficient to compensate for the dispersion of said predetermined length of dispersion-shifted fiber.

4. A dispersion-compensating fiber according to claim 1 or 3, wherein said dispersion-compensating fiber has a length L_{DCF} satisfying, with respect to light having a wavelength λ_m in signal wavelengths within the wavelength band in use, the following condition:

$$|D_{DSF}(\lambda_m) \cdot L_{DSF} + D_{DCF}(\lambda_m) \cdot L_{DCF}| \leq 200 \text{ ps / nm}$$

where

$D_{DSF}(\lambda_m)$ is the dispersion of the dispersion-shifted fiber at the wavelength λ_m ;

L_{DSF} is the length of the dispersion-shifted fiber;

$D_{DCF}(\lambda_m)$ is the dispersion of the dispersion-compensating fiber at the wavelength λ_m ; and
 L_{DCF} is the length of the dispersion-compensating fiber.

5. A dispersion-compensating fiber according to claim 4, wherein the length L_{DCF} of said dispersion-compensating fiber satisfies, with respect to all signal wavelengths λ_{all} of light within the wavelength band in use, the following condition:

$$|D_{DSF}(\lambda_{all}) \cdot L_{DSF} + D_{DCF}(\lambda_{all}) \cdot L_{DCF}| \leq 200 \text{ ps / nm}$$

where

$D_{DSF}(\lambda_{all})$ is the dispersion of the dispersion-shifted fiber at all the wavelengths λ_{all} in use;

L_{DSF} is the length of the dispersion-shifted fiber;

$D_{DCF}(\lambda_{all})$ is the dispersion of the dispersion-compensating fiber at all the wavelengths λ_{all} in use; and

L_{DCF} is the length of the dispersion-compensating fiber.

6. A dispersion-compensating fiber according to claim 1 or 3, wherein the relative refractive index difference Δ_1 of said core with respect to said third cladding satisfies the following condition:

$$1\% \leq \Delta_1 \leq 2\%.$$

7. A dispersion-compensating fiber according to claim 1 or 3, wherein the relative refractive index difference Δ_1 of said core with respect to said third cladding satisfies the following condition:

$$2\% \leq \Delta_1 \leq 3\%.$$

8. A dispersion-compensating fiber according to claim 1 or 3, wherein a relative refractive index difference Δ_3 of said second cladding with respect to said third cladding satisfies the following condition:

$$\Delta_3 \geq 0.1\%.$$

9. A dispersion-compensating fiber according to claim 1 or 3, wherein the ratio of the outside diameter of said core to the outside diameter of said first cladding satisfies the following condition:

$$0.2 \leq 2a / 2b \leq 0.5.$$

10. A dispersion-compensating fiber according to claim 1 or 3, wherein, with respect to light having a wavelength of 1.55 μm , said dispersion-compensating fiber has a bending loss of 10 dB/m or less at a diameter of 60 mm, a polarization mode dispersion of 0.5 ps \cdot km^{-1/2} or less, and a transmission loss of 1 dB/km or less.

11. An optical transmission system comprising:

a predetermined length of a dispersion-shifted fiber having a zero-dispersion wavelength in a 1.55- μm wavelength band; and
the dispersion-compensating fiber according to claim 1 or 3;
wherein said optical transmission system has a total dispersion slope whose absolute value is 0.024 ps/nm²/km or less with respect to light having a shortest wavelength and light having a longest wavelength in signal wavelengths within a wavelength band in use.

12. An optical transmission system according to claim 11, wherein the absolute value of total dispersion slope in said optical transmission system is 0.012 ps/nm²/km or less with respect to light having the shortest wavelength and light having the longest wavelength in signal wavelengths within the wavelength band in use.

Fig.1A

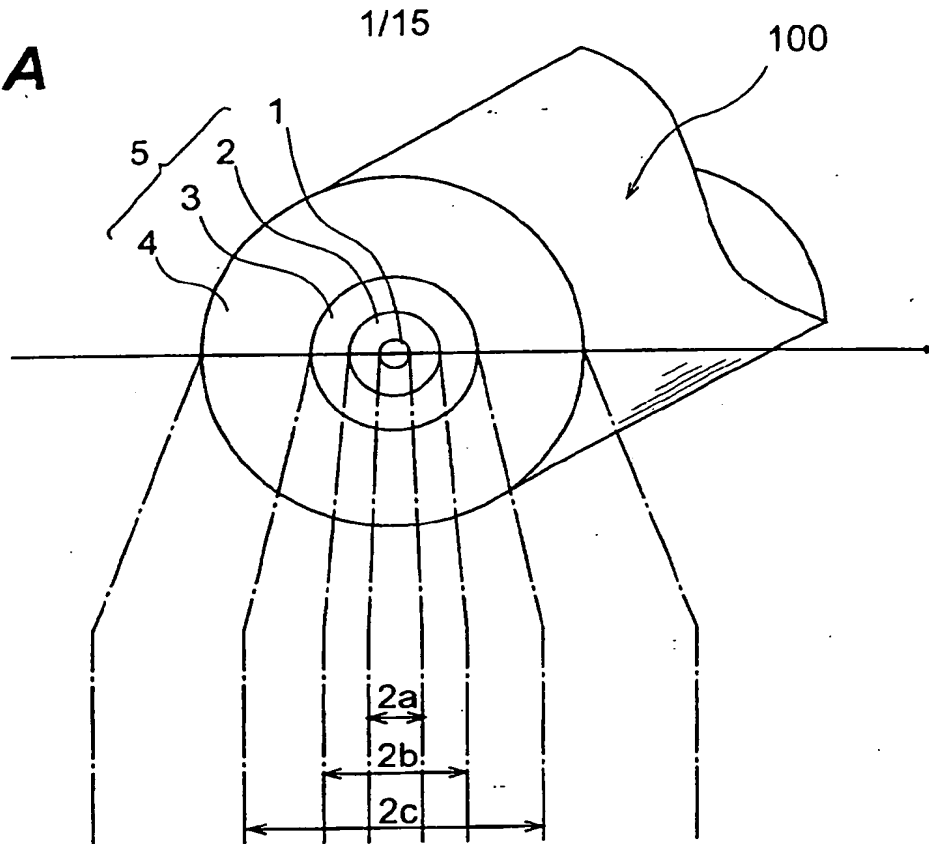


Fig.1B

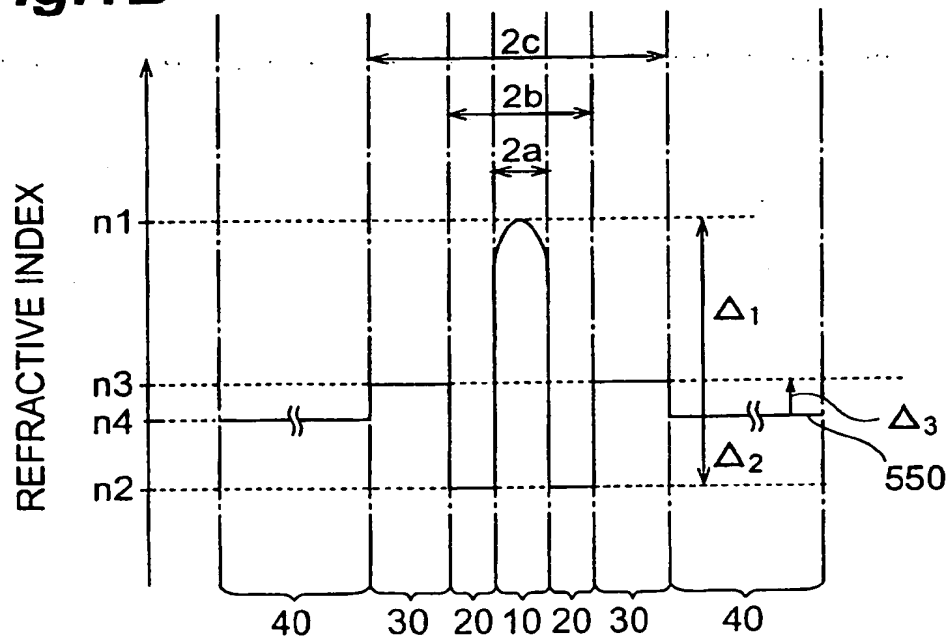


Fig.2

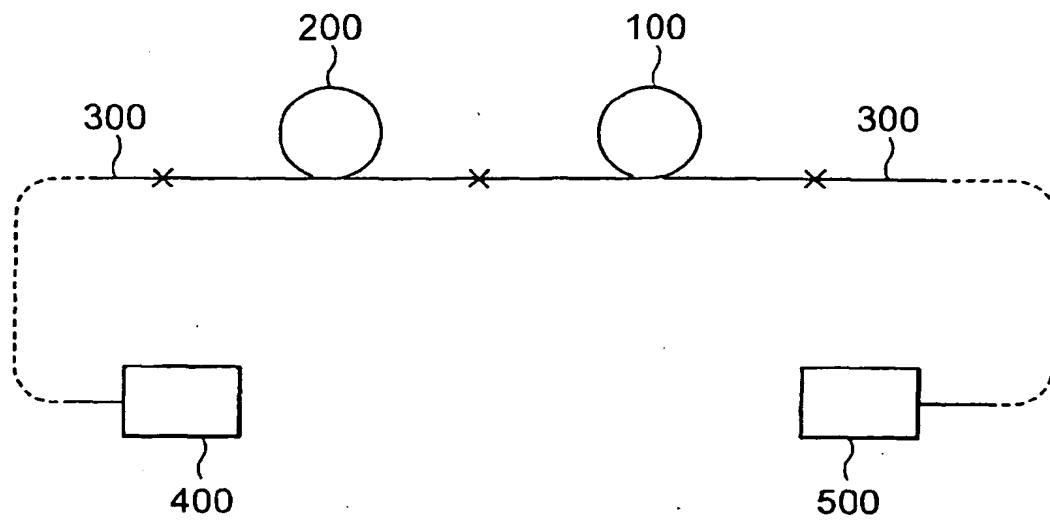


Fig.3A

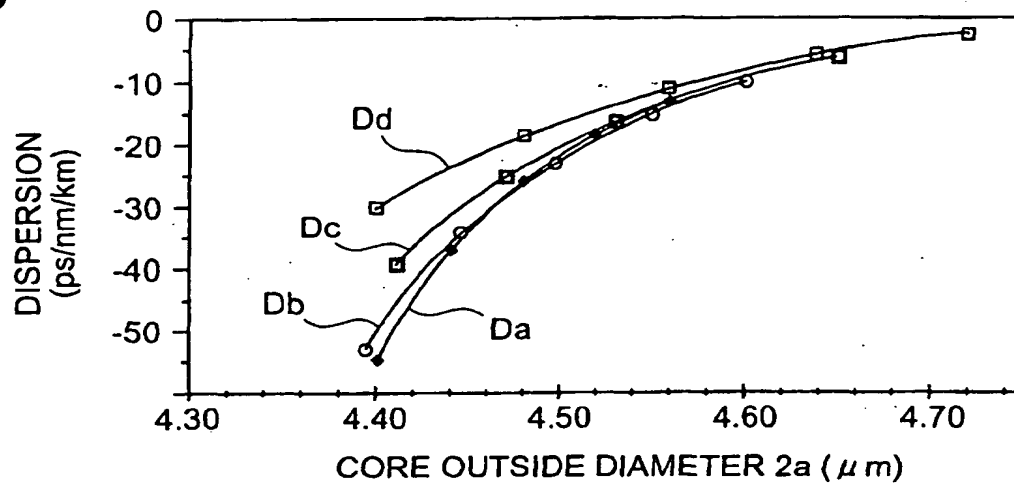


Fig.3B

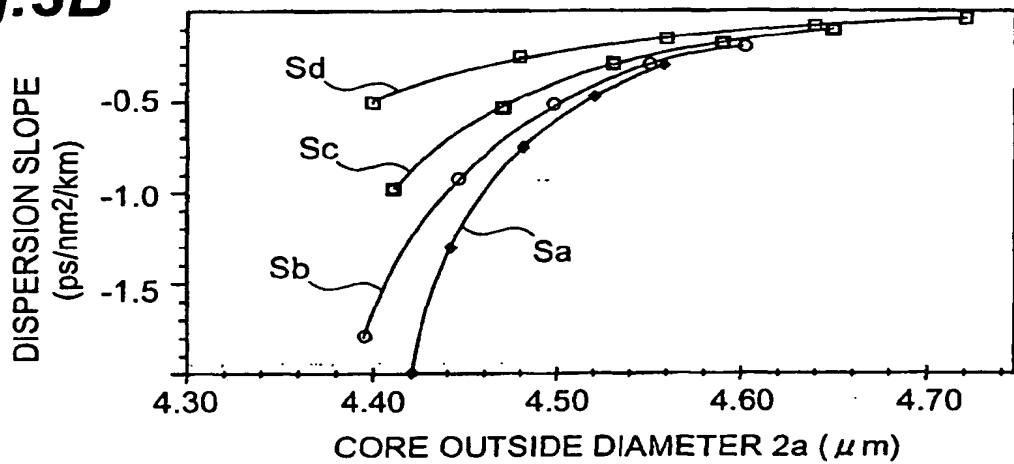


Fig.3C

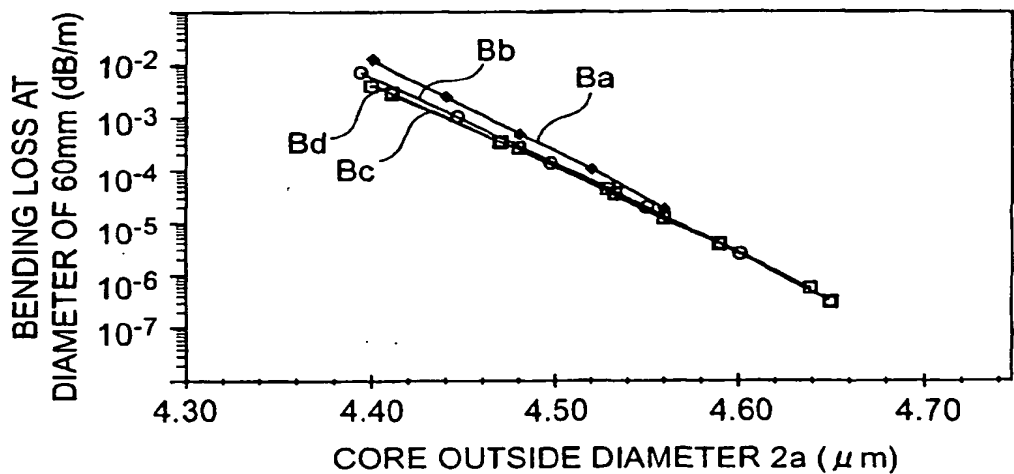


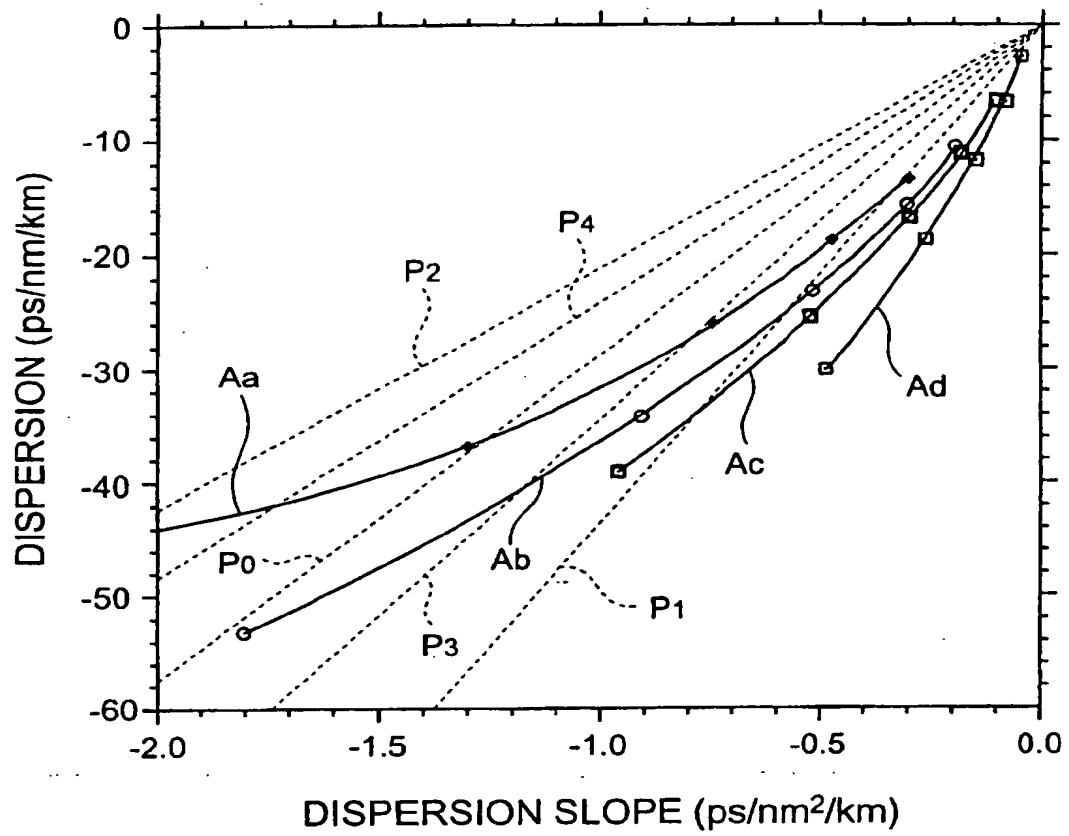
Fig.4

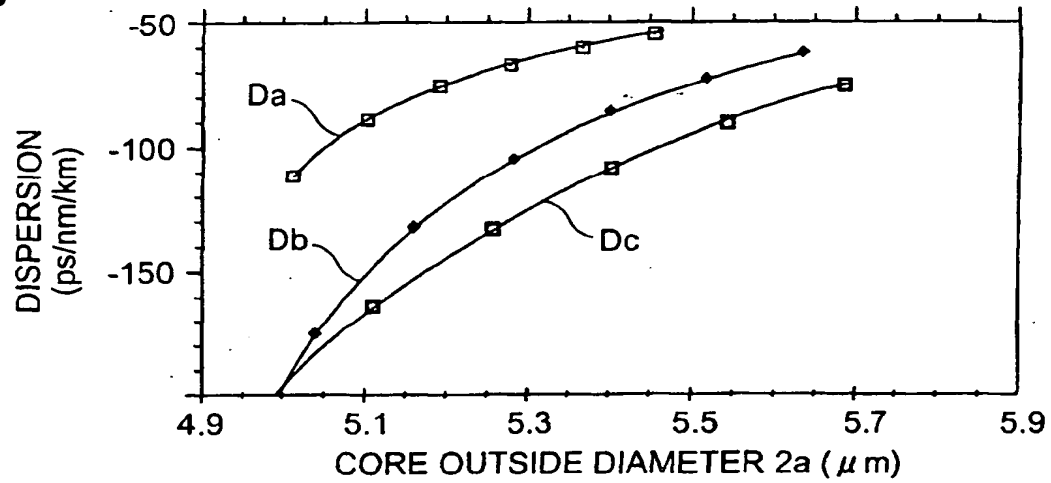
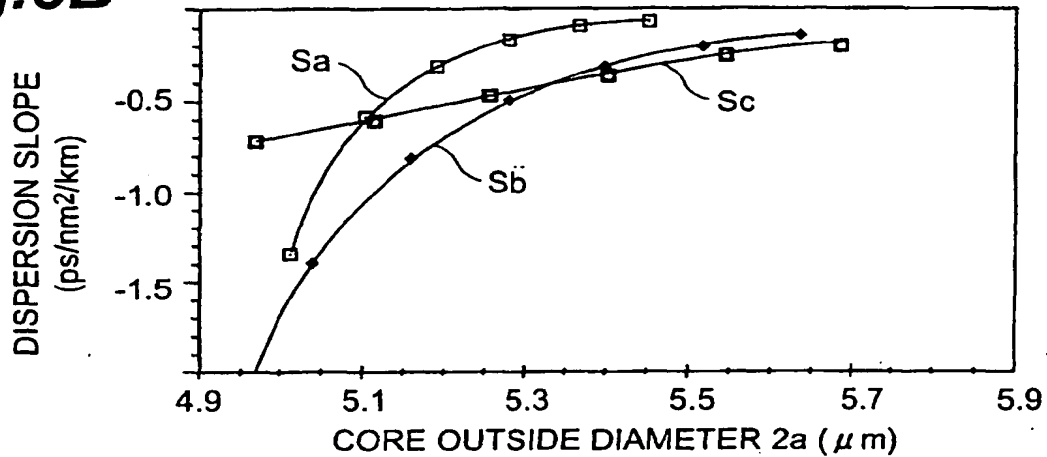
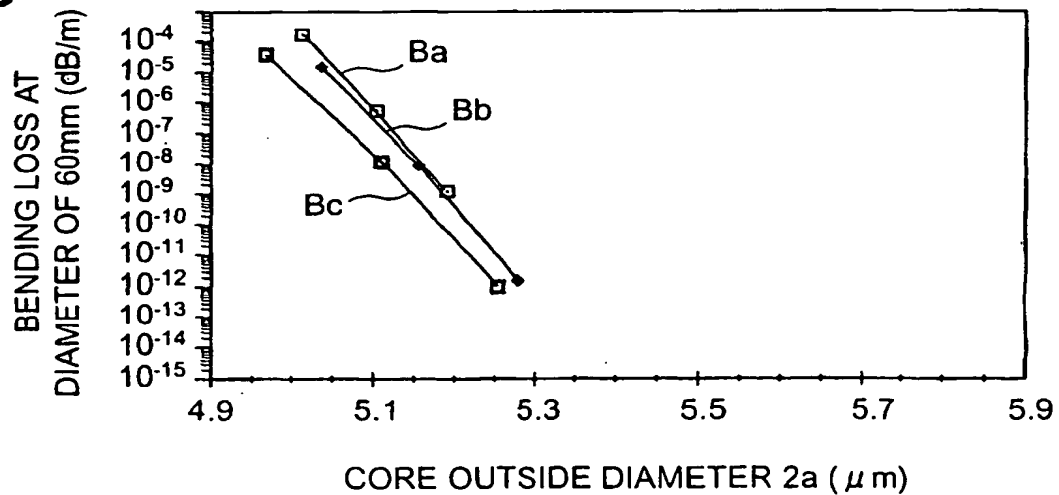
Fig.5A**Fig.5B****Fig.5C**

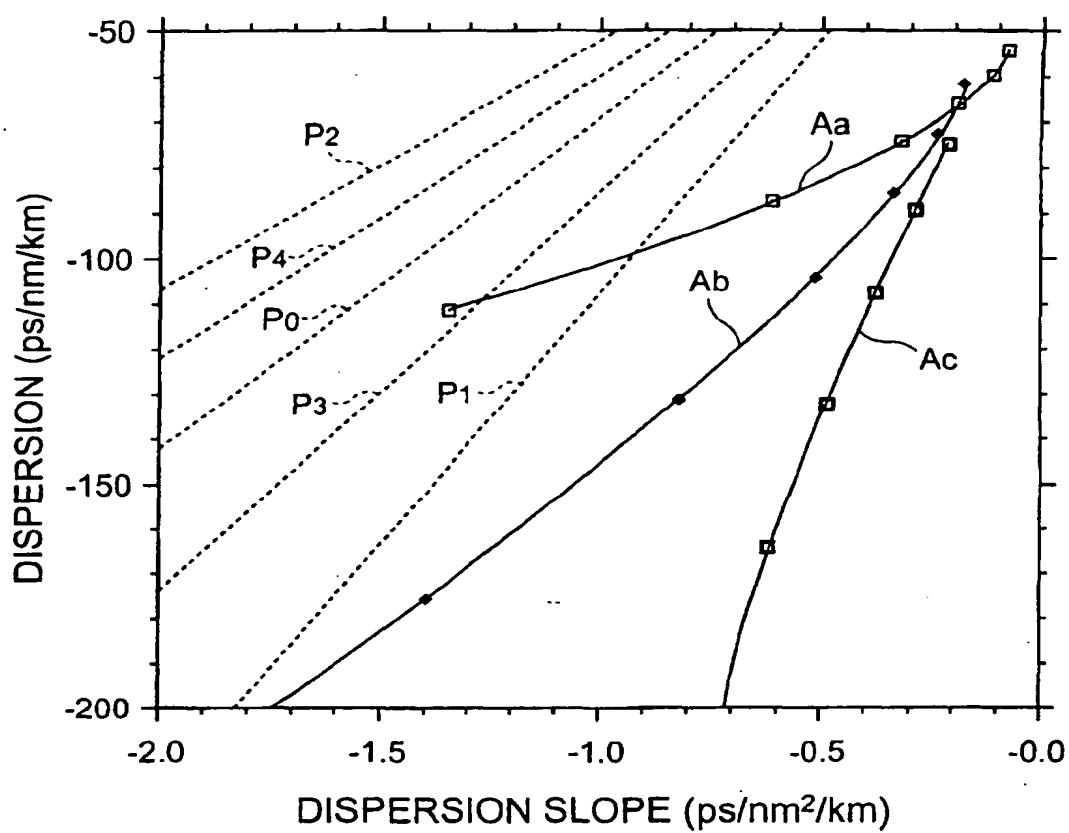
Fig.6

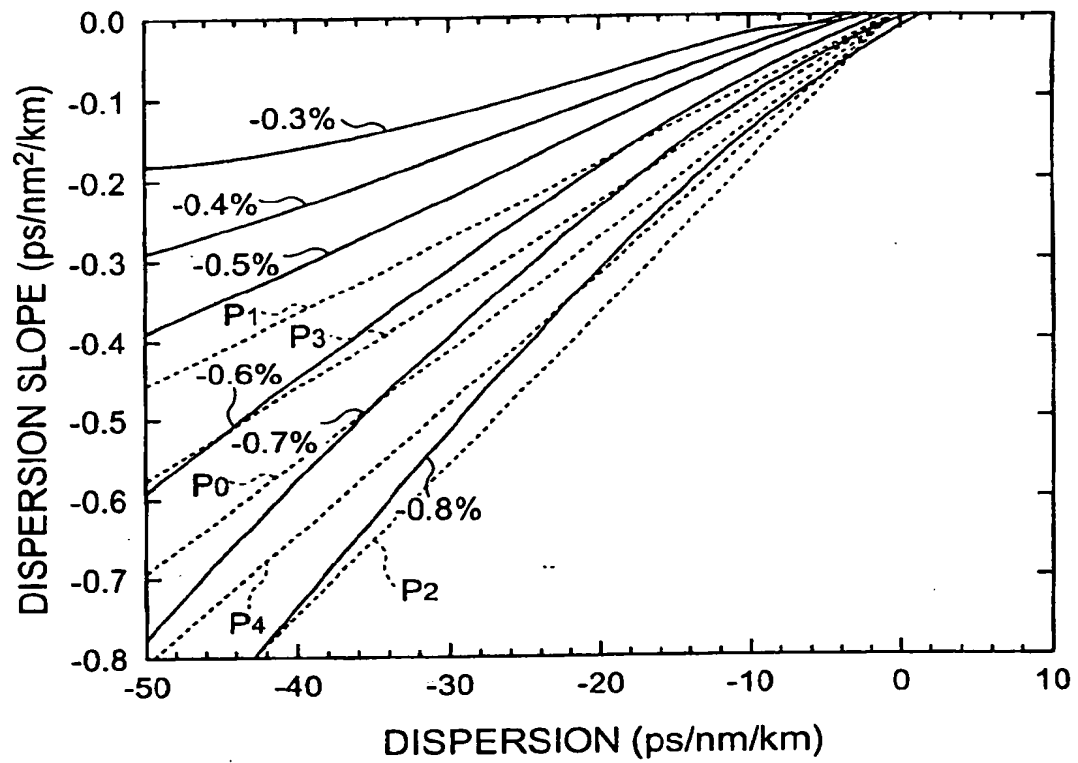
Fig.7

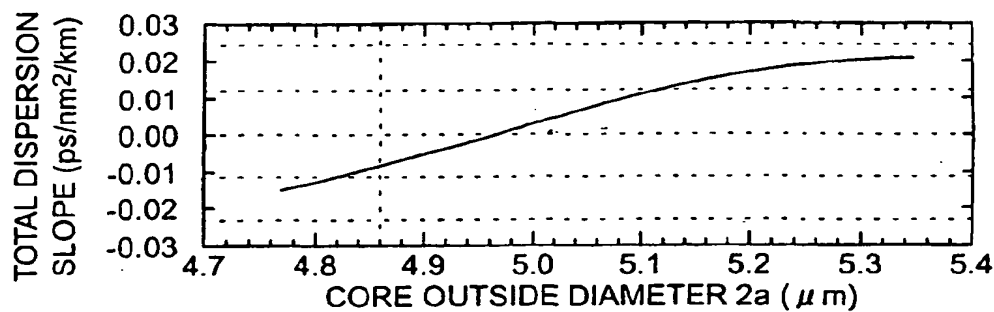
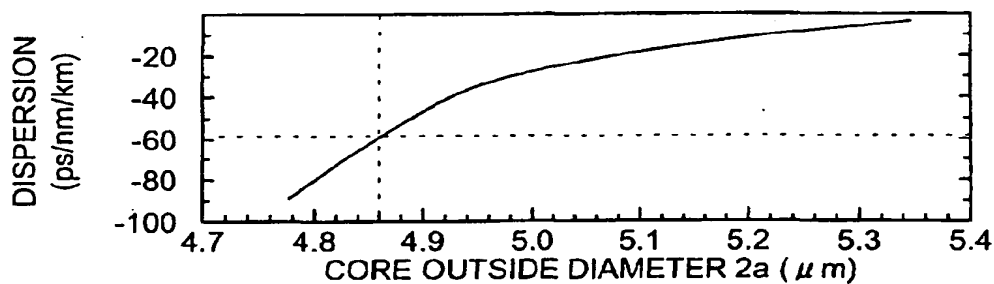
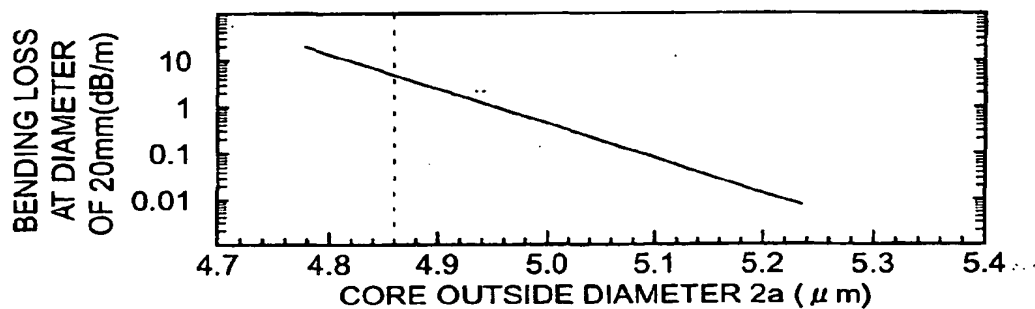
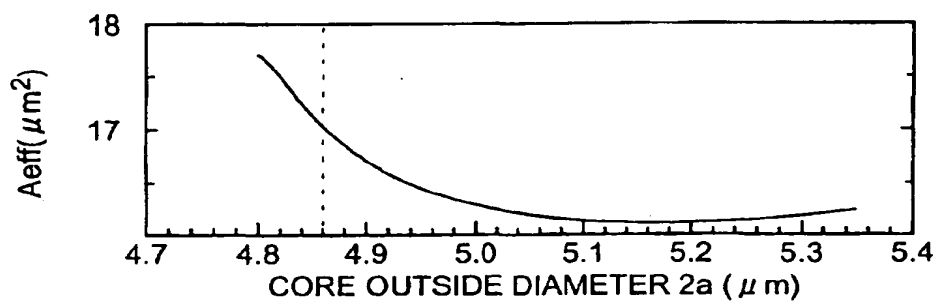
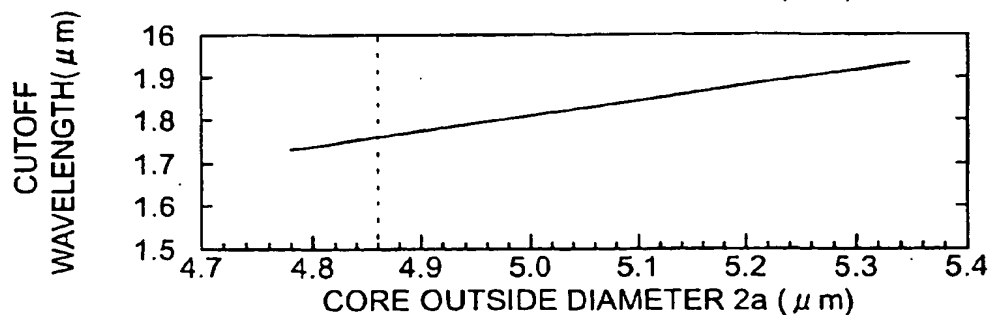
Fig.8A**Fig.8B****Fig.8C****Fig.8D****Fig.8E**

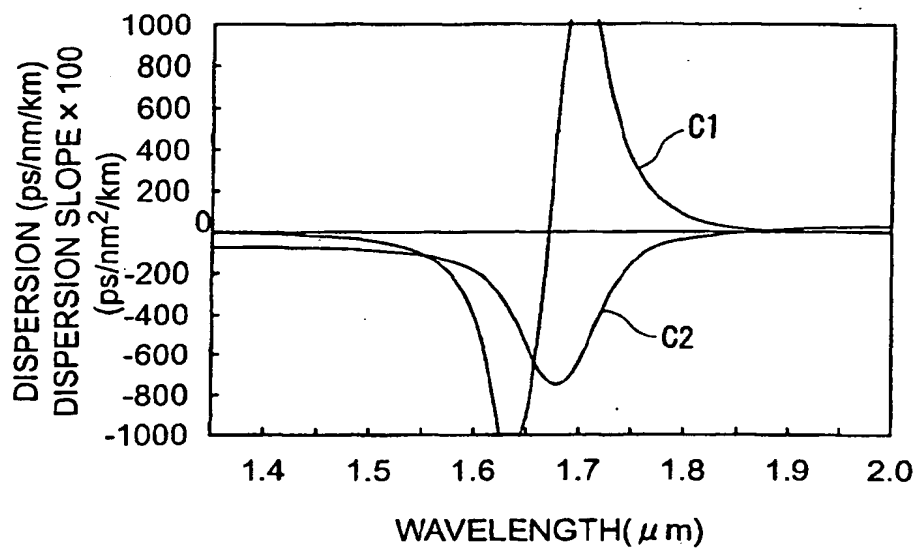
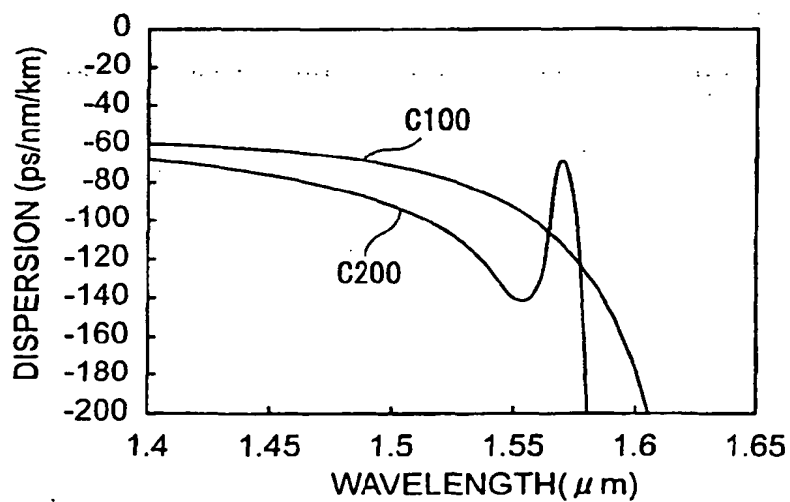
Fig.9**Fig.10**

Fig.11

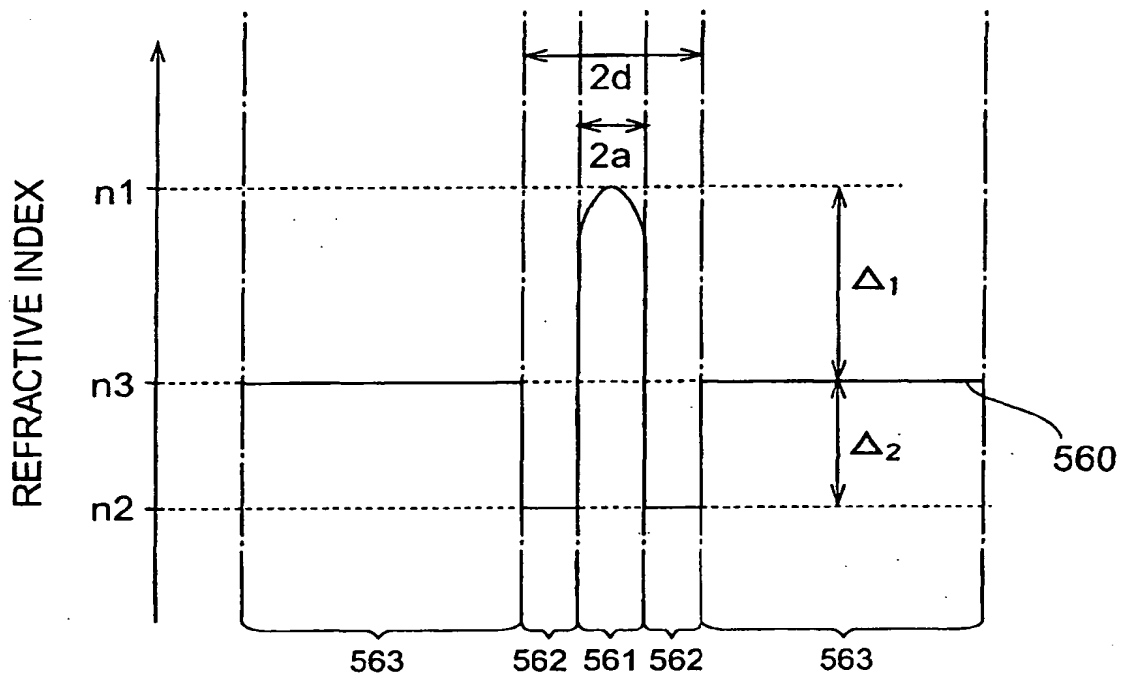


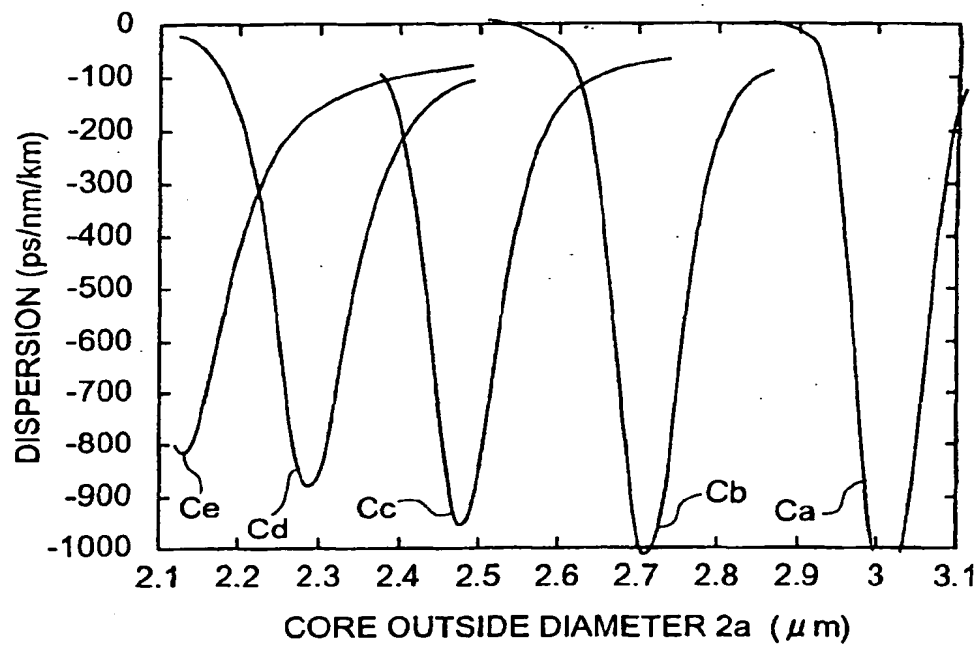
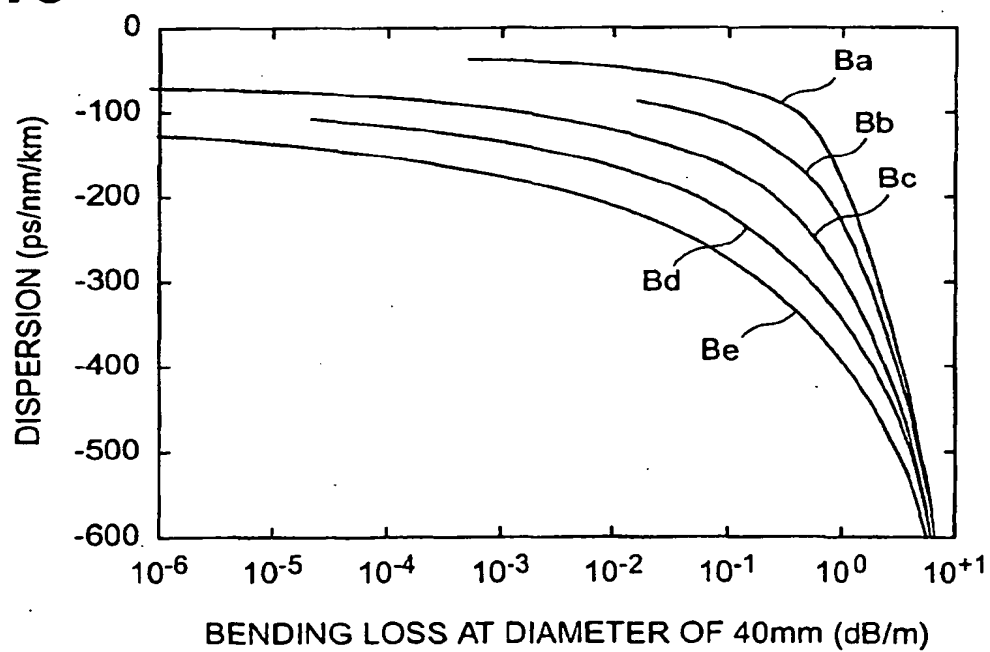
Fig.12**Fig.13**

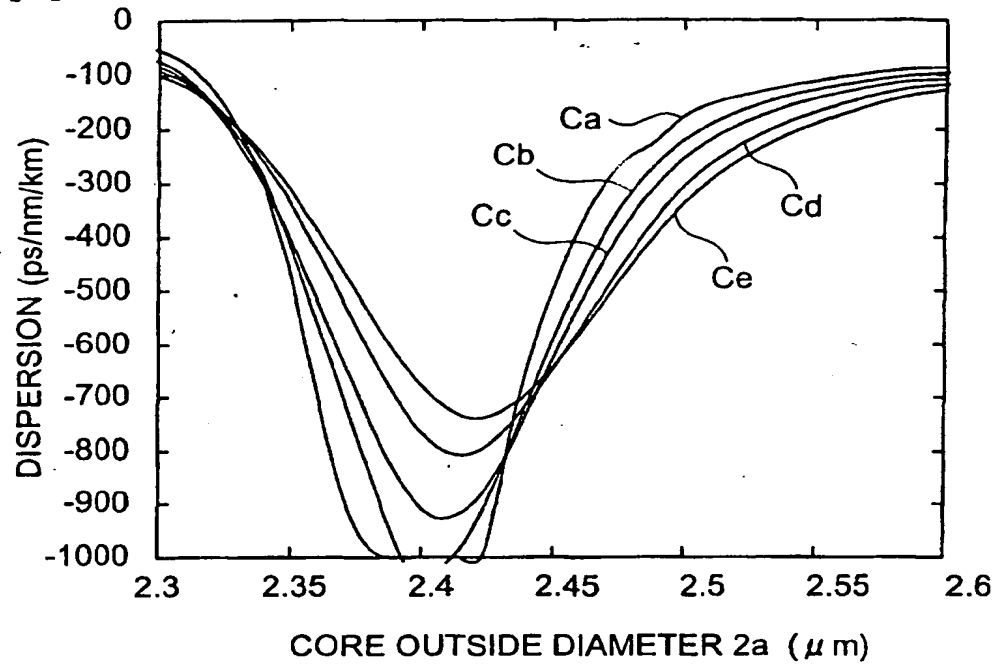
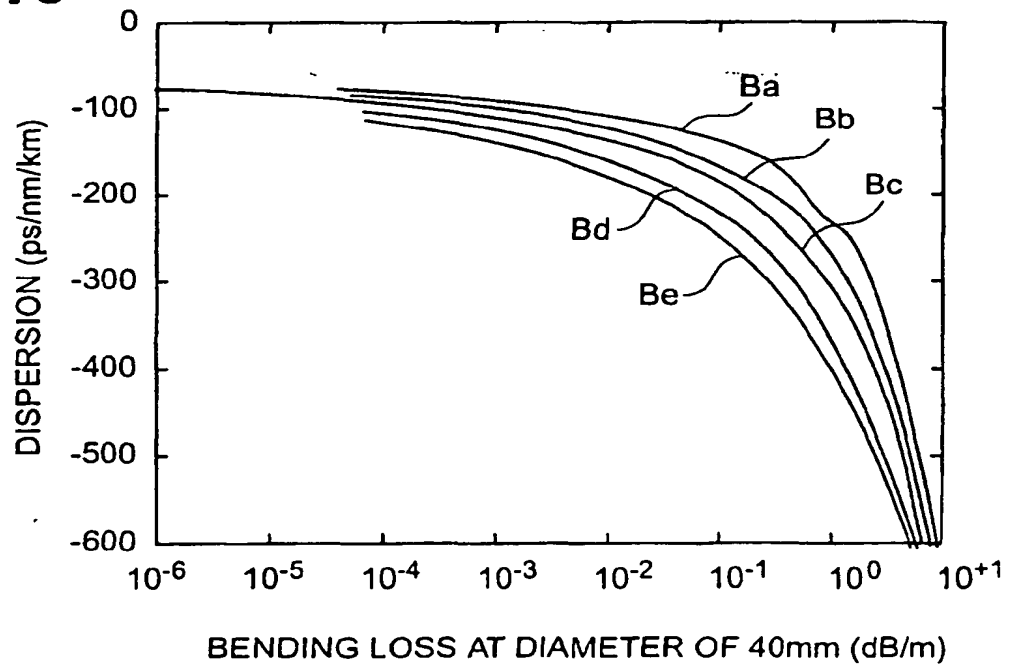
Fig.14**Fig.15**

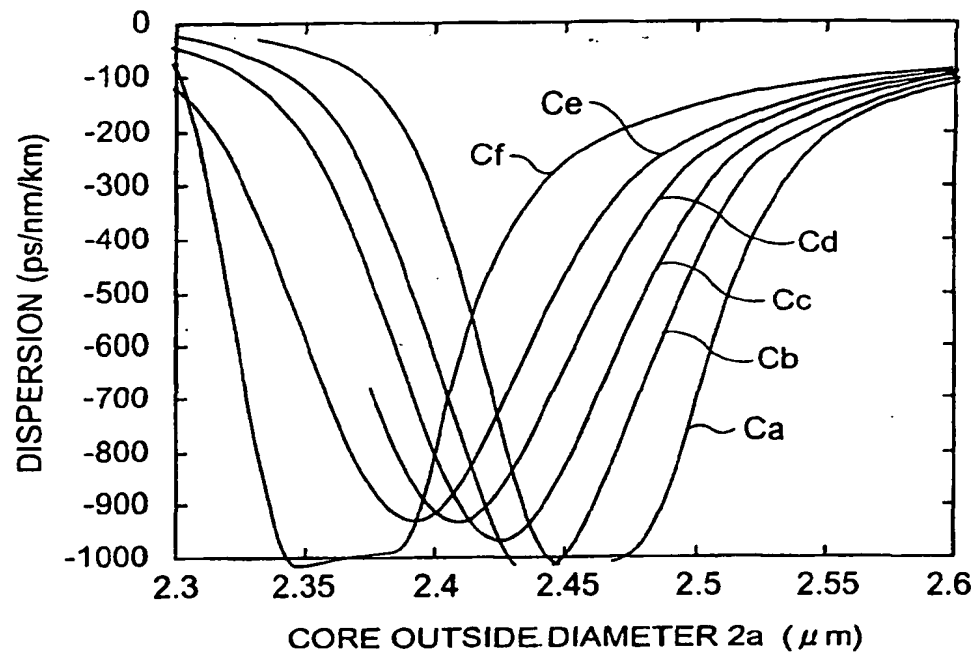
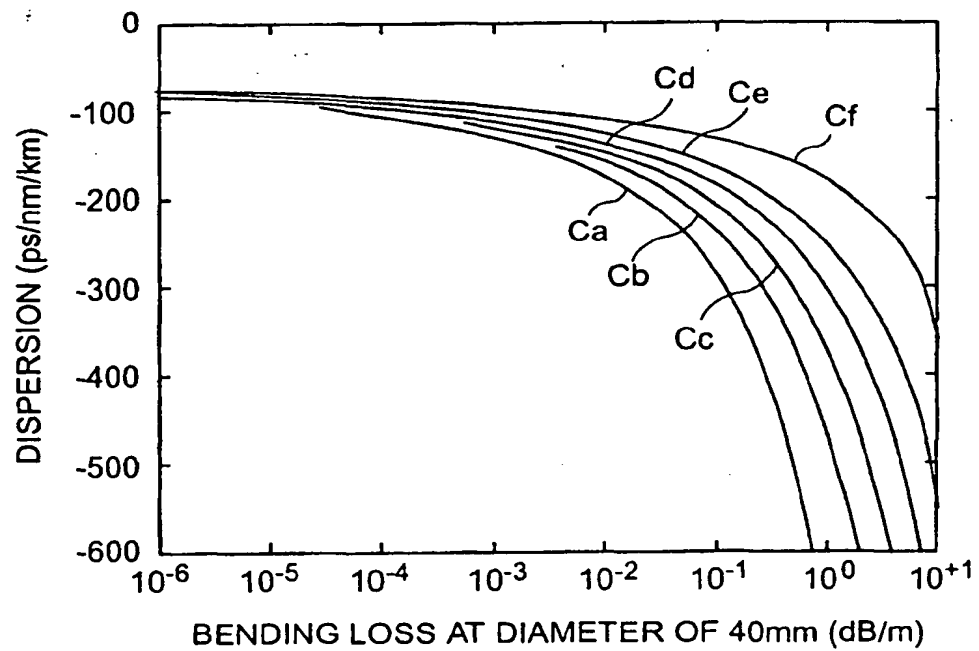
Fig.16**Fig.17**

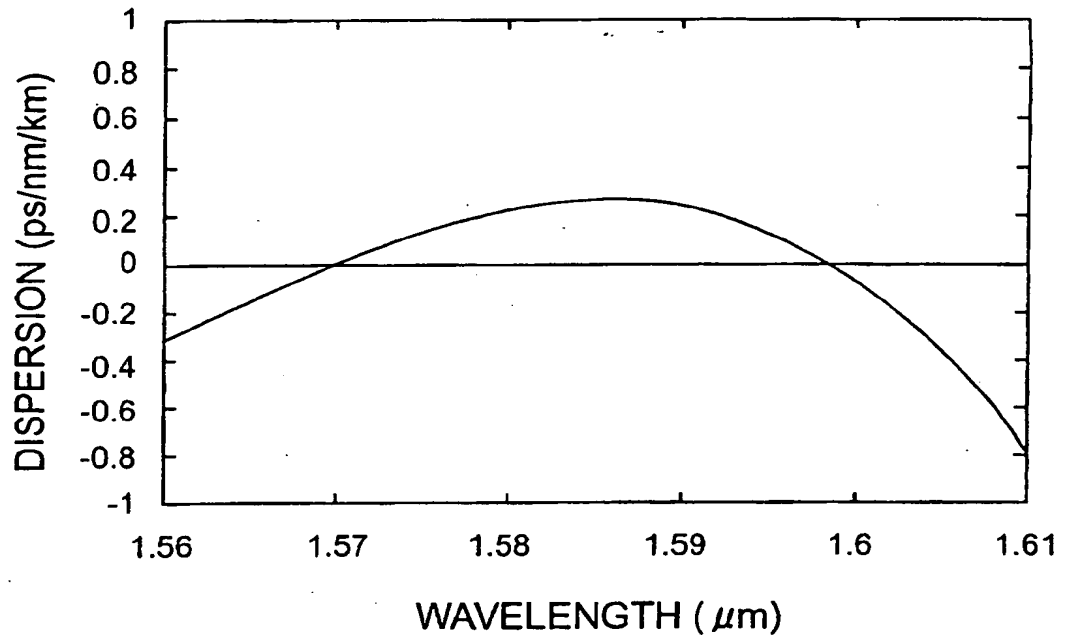
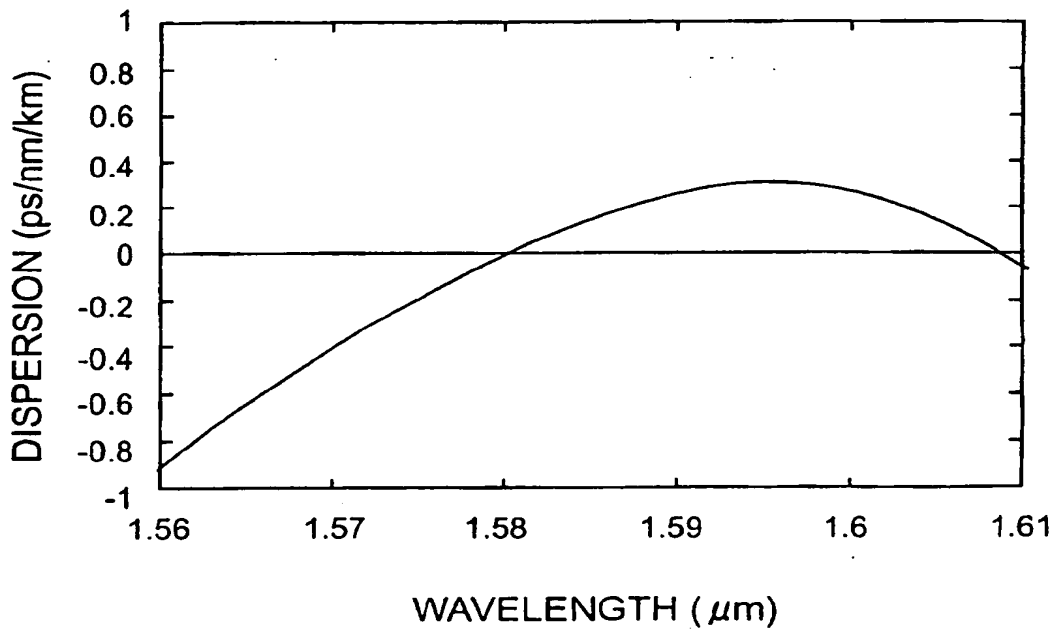
Fig.18**Fig.19**

Fig.20

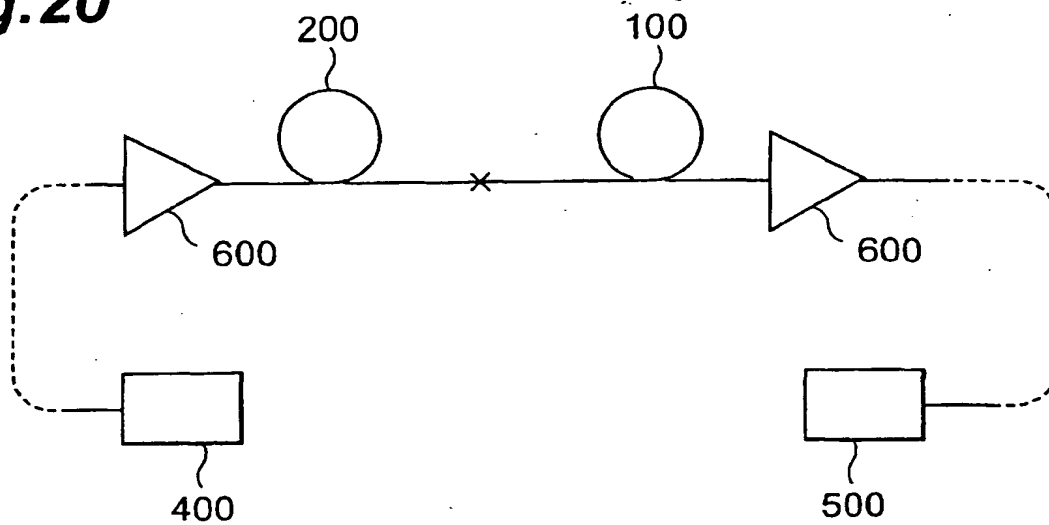
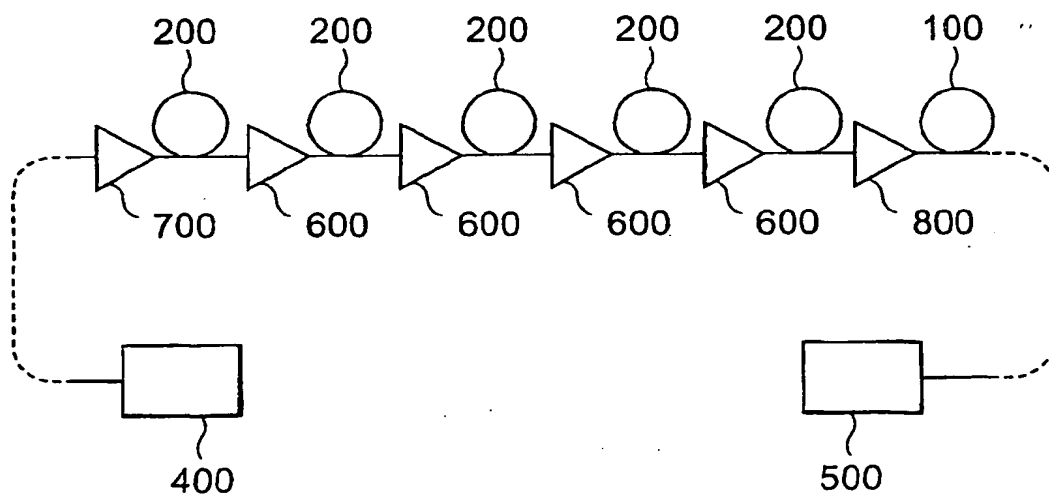


Fig.21



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP99/04413

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER
Int.Cl⁶ G02B 6/16, 6/22

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

Int.Cl⁶ G02B 6/00-6/54

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Jitsuyo Shinan Koho	1926-1996	Toroku Jitsuyo Shinan Koho	1994-1999
Kokai Jitsuyo Shinan Koho	1971-1999	Jitsuyo Shinan Toroku Koho	1996-1999

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y	JP, 10-39155, A (Sumitomo Electric Industries, Ltd.), 13 February, 1998 (13.02.98), Full text & CA, 2202586, A & US, 5838867, A	1-12
Y	JP, 9-127354, A (Sumitomo Electric Industries, Ltd.), 16 May, 1997 (16.05.97), Full text; especially, Par. No. [0039]; Figs. 1, 5-6, 9 & EP, 762159, A2 & US, 5740297, A	1-12
A	Nielsen L G et al., "Large volume manufacturing of dispersion-compensating fibers", OFC '98 Technical Digest, JICST, 29 May, 1998, pp. 24-25, especially, Fig. 1, Table 1	1-12
A	M. Onishi et al., "Third-order dispersion compensating fibres for non-zero dispersion shifted fibre links", ELECTRONICS LETTERS, Vol. 36, No. 25 (5th December 1996), pp. 2344-2345	1-12

☒ Further documents are listed in the continuation of Box C.
 ☐ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:	"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention
"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance	"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone
"E" earlier document but published on or after the international filing date	"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art
"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)	"&" document member of the same patent family
"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means	
"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed	

Date of the actual completion of the international search
09 November, 1999 (09.11.99)Date of mailing of the international search report
16 November, 1999 (16.11.99)Name and mailing address of the ISA/
Japanese Patent Office

Authorized officer

Facsimile No.

Telephone No.

Form PCT/ISA/210 (second sheet) (July 1992)

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No. -

PCT/JP99/04413

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	JP, 10-221562, A (Lucent Technologies Inc.), 21 August, 1998 (21.08.98) & EP, 859481, A & US, 5181673, A	1-12
A	JP, 8-313750, A (The Furukawa Electric Co., Ltd.), 29 November, 1996 (29.11.96), Par. No. [0011] & CA, 2170815, A & US, 5673354, A	1-12
A	JP, 8-136758, A (The Furukawa Electric Co., Ltd.), 31 May, 1996 (31.05.96), Fig. 5 & CA, 2157828, A & US, 5568583, A	1-12
A	JP, 7-270636, A (AT & T Corporation), 20 October, 1995 (20.10.95) & EP, 668520, A2 & US, 5448674, A	1-12
A	JP, 6-222235, A (American Telephone & Telegraph Company), 12 August, 1994 (12.08.94) & EP, 598554, A1	1-12
A	JP, 6-11620, A (Corning Inc.), 21 January, 1994 (21.01.94) & EP, 554714, A1 & CA, 2084217, A & US, 5361319, A	1-12
P,X	JP, 10-319266, A (Fujikura Ltd.), 04 December, 1998 (04.12.98), Full text; especially, Par. No. [0030]; Table 1; Fig. 1, 2 (Family: none)	3
P,A	T. Tsuda et al., "BROAD BAND DISPERSION SLOPE COMPENSATION OF DISPERSION SHIFTED FIBER USING NEGATIVE SLOPE FIBER", ECOC '98 (20-24 September 1998), Vol. 1, pp. 233-234	1-12

Form PCT/ISA/210 (continuation of second sheet) (July 1992)